

Wie gut simulieren heutige globale GCMs den saisonalen Niederschlag über dem Alpenraum?

Resultate eines Forschungspraktikums in Klimatologie am Geographischen Institut der Universität Bern

Pavel Michna¹, Leitung: D. Gyalistras²

12. August 2002

Zusammenfassung

Der saisonale Niederschlag dreier globaler Zirkulationsmodelle (GCMs) wird auf der Ebene einzelner Gitterpunkte mit einem hochaufgelösten Messdatensatz verglichen. Zu diesem Zweck wird der Messdatensatz auf das Gitter der GCMs reduziert. Anschliessend werden die Mittelwerte und Varianzen (letztere als Ausdruck der interannuellen Variabilität) der Messdaten und GCMs für ein Mittel zweier Gitterpunkte im Alpenraum und als West-Ost-Profil auf der Ebene einzelner Gitterpunkte für die Periode 1961–1990 miteinander verglichen. Am besten schneidet in diesem Vergleich das ECHAM4/OPYC3-Modell ab, gefolgt von den Modellen HadCM3 und CGCM1.

Im Mittel über alle Modelle und Jahreszeiten wird der saisonale Niederschlag um ca. 25% überschätzt, etwa die Hälfte der Differenzen ist signifikant. Am besten wird der saisonale Niederschlag im Herbst und Frühling, am schlechtesten im Winter simuliert. Obwohl der Niederschlag besser simuliert wird als zunächst angenommen, stehen die Resultate in Übereinstimmung mit vergleichbaren Studien. Die interannuelle Variabilität wird durchwegs recht gut modelliert, es treten nur wenig signifikante Differenzen auf.

1 Einleitung

Im Alpenraum kommt dem Niederschlag eine besonders wichtige Stellung zu, denn von ihm hängen nicht nur z.B. die Landwirtschaft und die Wasserkraftnutzung ab, sondern unter anderem auch die meisten Oberflächenprozesse wie etwa Rutschungen, Murgänge und Lawinen. Im Zusammenhang mit der Diskussion um die globale Klimaänderung stellt sich auch die Frage, inwieweit im Alpenraum mit einem veränderten Niederschlagsregime zu rechnen ist.

Als bedeutendstes Hilfsmittel zur Untersuchung einer solchen möglicherweise anthropogen mitverursachten Klimaänderung dienen die globalen Klimamodelle, welche in der jüngsten Generation nicht nur die Atmosphäre simulieren, sondern mit Ozeanmodellen gekoppelt sind und nicht zuletzt auch Meer-Eis- und Landnutzungsmodelle umfassen (Coupled General Circulation Models, CGCMs). Um die Aussagekraft solcher Modelle beurteilen zu können, ist es notwendig, Simulationsläufe des aktuellen Klimas mit Messdaten zu vergleichen.

Kittel et al. (1998) verglichen die Resultate von neun GCMs mit Messdaten und stellten fest, dass die kleinsten Abweichungen im Winter über Süd- und Nordeuropa auftraten ($\leq 20\%$ der Messwerte), im Sommer betragen diese hingegen -70% bis $+40\%$. Modelle mit Korrekturen der Massen- und Energieflüsse zwischen Atmosphäre und Ozean („Flusskorrekturen“) und Modelle mit einer besseren horizontalen Auflösung wiesen tendenziell kleinere Abweichungen auf.

Während im Second Assessment Report des IPCC (SAR) die Resultate der GCMs auf subkontinentaler Ebene noch als wenig gesichert galten und unter anderem auch die Notwendigkeit

¹Pavel Michna, Climate and Background Ozone (CABO), Physical Geography, University of Berne, Hallerstrasse 12, CH-3012 Berne/Switzerland

²Dr. Dimitrios Gyalistras, Climatology and Meteorology (KLIMET), Department of Geography, University of Berne, Hallerstrasse 12, CH-3012 Berne/Switzerland

nach besseren Messdaten zur Validierung unterstrichen wurde (IPCC, 2001b), stellt der Third Assessment Report (TAR) eine deutliche Verbesserung der GCMs fest. Die Abweichungen für den Niederschlag liegen für Süd- und Nordeuropa nun im Bereich -40% bis $+60\%$, wobei der Niederschlag im Winter meist überschätzt wird (Giorgi und Francisco, 2000b in: IPCC, 2001b). Giorgi und Francisco (2000a) stellten in ihrer Studie mit verschiedenen Szenarien des HadCM2 eine Überschätzung der interannuellen Variabilität des Niederschlags fest. Zusammenfassend wird im TAR festgehalten, dass die GCMs trotz vielfach signifikanter Abweichungen brauchbare Resultate erzielen. Die Qualität ist jedoch in kleinen Gebieten mit ausgeprägter Topographie deutlich schlechter (IPCC, 2001b).

Die Auflösung der Modelle (meist T42, d.h. 300×300 km am Äquator) ist für den Alpenraum immer noch sehr grob, feinere Auflösungen können jedoch mittels numerischer oder statistischer Regionalisierungstechniken erzeugt werden (Gyalistras et al., 1998). Eine Untersuchung auf der Ebene einzelner weniger Gitterpunkte im Alpenraum macht dennoch Sinn, denn sie ist einerseits an und für sich interessant, stellt aber andererseits auch eine mögliche Vorstufe für ein Downscaling mit Berücksichtigung des Niederschlags als Prädiktorgröße dar.

Widmann und Bretherton (2000) fanden für den Nordwesten der USA zwischen den NCEP/NCAR Analysedaten (gedacht als das Resultat einer mit Messdaten konsistenten GCM-Simulation) und einem gegitterten Niederschlagsdatensatz eine gute Übereinstimmung. Obwohl festgehalten wird, dass aufgrund der groben Modelltopographie auf kleinskaliger Ebene systematische Fehler auftreten, werden GCM-Niederschläge als möglicherweise guter Indikator für statistisches Downscaling gesehen. Trotzdem stellen sie fest, dass in vielen Studien anstelle des GCM-Niederschlags die grossräumige Zirkulation als verlässlicherer Indikator für den kleinskaligen Niederschlag angesehen wird.

Dieser Weg wird etwa von Busuioc et al. (1999) für den saisonalen Niederschlag in Rumänien gewählt, wo die durch GCMs simulierte grossräumige Zirkulation in einem statistischen Modell für das Downscaling des Niederschlags im Winter und teilweise im Frühling und Herbst einen guten Indikator darstellt.

Diese Autoren weisen auch darauf hin, dass die grobe horizontale Auflösung der Modelle einen möglichen Grund für das Versagen der GCMs auf regionaler Ebene darstellt. Denn diese ermöglicht nur eine sehr grobe Beschreibung der für das Regionalklima wichtigen Prozesse in der Nähe der Erdoberfläche. Dadurch ist es nicht möglich, direkte Aussagen auf der Ebene einzelner Gitterpunkte oder darunter zu treffen.

Das Ziel der vorliegenden Studie ist eine Aussage darüber zu erhalten, wie gut GCMs den saisonalen Niederschlag an einzelnen Gitterpunkten im Alpenraum simulieren. Darunter wird nicht nur ein Vergleich der Mittelwerte verstanden, sondern auch ein Vergleich der interannuellen Variabilität, denn ihr kommt im Zusammenhang mit Extremereignissen ebenfalls eine grosse Bedeutung zu. Zu diesem Zweck wird ein hochaufgelöster Datensatz stufenweise auf das GCM-Gitter interpoliert und dann mit den Resultaten von drei ausgewählten GCMs verglichen. Untersucht werden Mittelwert und Varianz des Mittels zweier Gitterpunkte die über dem Alpenraum liegen und ein aus vier Gitterpunkten bestehendes West-Ost-Profil durch die Alpen.

2 Material und Methoden

2.1 Daten

2.1.1 Messdaten

Der verwendete Referenzdatensatz umfasst den Zeitraum 1961–1990 des Niederschlags-Datensatzes von C. Schmutz (2001a und Schmutz et al., 2001). Dabei handelt es sich um einen gegitterten Datensatz mit einer Auflösung von $0.3^\circ \times 0.22^\circ$ in West-Ost- bzw. Nord-Süd-Richtung, was einem Gitternetz von ungefähr 25×25 km entspricht. Die Daten liegen als Monatsmittelwerte in mm/Tag für das Gebiet des engeren Alpenraums (ca. $2.1^\circ\text{E} - 18.9^\circ\text{E}$ und $49.9^\circ\text{N} - 42.2^\circ\text{N}$) vor.

Der Datensatz wurde aus zwei verschiedenen Datensätzen zusammengestellt. Er umfasst eine Rekonstruktion durch Schmidli und Schmutz (2001) für den Zeitraum 1901–1970 und den grob gera-

sterten Datensatz von C. Schmutz (2001b) für die Periode 1971–1990 (freundl. Mitt. C. Schmutz, 2002). Zum ersteren Datensatz können keine weiteren Angaben gemacht werden, da die entsprechende Publikation zum Zeitpunkt der Niederschrift der vorliegenden Arbeit noch nicht verfügbar war. Die Rekonstruktionsmethodik selbst kann jedoch Schmidli et al. (2001) entnommen werden. Der zweite Teil des Datensatzes wurde aus 500 Niederschlags-Zeitreihen generiert. Diese wurden zunächst einem Homogenitätstest unterzogen und anschliessend in unterschiedliche Qualitätsstufen eingeteilt, so dass es möglich war, für die Periode 1901–1995 einen Datensatz mit einer Auflösung von 25 km aus 176 Zeitreihen zu generieren, welcher den Ansprüchen klimatologischer Analysen genügt. Die wichtigsten Eigenschaften der Alpenen Niederschlagsklimatologie wie hohe jährliche Niederschlagswerte im Norden und Nordosten der Alpen, Vorarlberg, Tessin und Piemont sowie die trockeneren inneralpinen Täler (Tirol, Rheintal, Wallis) werden gut abgebildet. Dies gilt auch für die saisonalen Mittel, die weitestgehend in Übereinstimmung (Schmutz, 2001b) mit dem Datensatz von Frei und Schär (1998) stehen. Letzterer wurde aus über 6000 Niederschlags-Zeitreihen für die Periode 1971–1990 in einer Auflösung von ebenfalls 25 km erstellt. Weil dieser Datensatz aber nur 20 Jahre umfasst, erschien es wenig sinnvoll, die GCM-Analyse zusätzlich auch mit diesen Daten durchzuführen.

2.1.2 Modelldaten

In dieser Studie werden die Resultate dreier GCMs betrachtet. Bedeutendste Kriterien für die Modellwahl waren einerseits die Tatsache dass alle drei Modelle relativ neu sind und andererseits, dass für den Alpenraum viele Szenarien mit diesen oder früheren Versionen dieser Modelle existieren (siehe Gyalistras, 2000 in: Wanner et al., 2000).

Das Canadian Global Coupled Model CGCM1 Das CGCM1 des Canadian Centre for Climate Modeling and Analysis (CCCma) simuliert die Atmosphäre mit einer horizontalen Auflösung von T32 und mit 10 Vertikalschichten, für den Ozean wird ein $1.8^\circ \times 1.8^\circ$ -Gitter mit 19 Schichten verwendet (CMIP, 2002). Es handelt sich dabei um ein spektrales Modell. Hier wird der Modelllauf des IS92a-Szenarios verwendet (Zeitraum 1900–2100), d.h. ein Greenhouse-Gas Forcing mit Sulphat-Aerosolen.

Das hier verwendete CGCM1 ist das erste gekoppelte Atmosphären-Ozean-Modell des CCCma mit einer dreidimensionalen Ozeankomponente. Dieses Modell verwendet monatliche Flusskorrekturen für den Wärme- und Süswasserfluss. Beim Ozeanmodell handelt es sich um das GFDL MOM (Version 1) mit einigen Anpassungen. Auf jeden Gitterpunkt der Atmosphäre kommen vier Punkte des Ozeanmodells. Die beiden Modelle werden einmal pro Tag gekoppelt, dabei werden täglich gemittelte Flüsse ausgetauscht und auf die entsprechenden Gitter interpoliert. Eine Flusskorrektur verhindert eine unerwünschte Drift des Klimamodells. Diese bewegt sich im Rahmen der Korrekturen vergleichbarer GCMs (Flato et al., 2000).

Das ECHAM4/OPYC3-Modell Der hier verwendete ECHAM4/OPYC3-Kontrolllauf weist im Originaldatensatz eine T42-Auflösung mit 19 Schichten für die Atmosphäre und ein $2.8^\circ \times 2.8^\circ$ -Gitter mit 11 Schichten für den Ozean auf (CMIP, 2002). Gerechnet wurde das Modell über 240 Jahre hinweg mit auf dem Niveau von 1990 konstant gehaltenen CO_2 -, CH_4 - und NO_2 -Konzentrationen. Die Konzentrationen von FCKW und anderen industriell hergestellten Gasen wurden auf Null herabgesetzt, während für Ozon und Aerosole klimatologische Verteilungen verwendet wurden (DKRZ, 2000).

Beim hier verwendeten Modell handelt es sich um die vierte Generation des CGCM des Max-Planck-Instituts. Wie seine Vorgänger stammt es vom Europäischen Modell für Mittelfristprognose (ECMWF) ab und wurde mit dem Ozeanmodell OPYC3 gekoppelt. Das Atmosphärenmodell arbeitet mit Zeitschritten von 24 Minuten für sämtliche Variablen bis auf die Strahlung, welche lediglich alle 2 Stunden neu gerechnet wird. Das Ozeanmodell besteht aus drei miteinander gekoppelten Teilmodellen nämlich einem Modell für den tieferen Ozean, einem Mischungsschicht-Modell und einem Meer-Eis-Modell. Vor der eigentlichen Kopplung wurde das OGCM während 1000 Jahren mit einer Kombination beobachteter und mittels des AGCM simulierter Anfangsbedingungen

laufengelassen. Um eine Drift unmittelbar nach der Kopplung möglichst zu vermindern, wurde eine Flusskorrektur durchgeführt (Roeckner et al., 1996).

Das Hadley Centre Climate Model HadCM3 Das HadCM3 des Hadley Center for Climate Prediction and Research ist ein gegittertes Modell mit einer Auflösung von $2.5^\circ \times 3.75^\circ$ mit 19 Schichten für das Atmosphärenmodell und von $1.25^\circ \times 1.25^\circ$ mit 20 Schichten im Ozeanmodell (CMIP, 2002). Das hier verwendete GHG1A-Szenario geht von einem Greenhouse-Gas Forcing mit allen anthropogenen Forcingfaktoren aus und erstreckt sich über den Zeitraum 1860–2099.

Im Gegensatz zu den beiden vorher vorgestellten Modellen verwendet das HadCM3 keine Flusskorrekturen. Es erfolgt auch kein Vorlauf der Teilmodelle vor der Kopplung, sondern ein Vorlauf von 400 Jahren für das gekoppelte Modell. Das Atmosphärenmodell ist eine Version des UKMO unified forecast and climate model, welches in Zeitschritten von 30 Minuten rechnet. Gesamthaft kommen in diesem Model 16 Ozean-Gitterflächen auf eine Atmosphären-Gitterfläche (Gordon et al., 2000).

2.2 Methoden

2.2.1 Datenaufbereitung

Für die weitere Analyse wurden aus dem Messdatensatz zunächst für jedes Jahr saisonale Mittel (DJF, MAM, JJA, SON) erstellt und anschliessend wurden die Originaldaten in 5 Schritten mithilfe des PINGO-Programmpakets (Lenzen, 1996) auf ein $5^\circ \times 5^\circ$ -Gitter reduziert. Damit ist ein direkter Vergleich auf der Ebene einzelner Gitterpunkte mit den drei Klimamodellen möglich.

Die hier verwendeten GCM-Daten lagen bereits im benötigten $5^\circ \times 5^\circ$ -Gitter vor. Die Interpolationen wurde bereits früher von R. Kernen (freundl. Mitt. D. Gyalistras, 2002) ebenfalls mit dem PINGO-Interpolationsverfahren durchgeführt. Hier mussten lediglich die saisonalen Mittel (ebenfalls für jedes Jahr) berechnet werden.

2.2.2 Vergleichsmethodik

Die räumliche Auflösung der GCM-Datensätze von $5^\circ \times 5^\circ$ sowie die Lage der Gitterpunkte ergeben maximal vier Gitterpunkte über dem Alpenraum, nämlich eine West-Ost Transversale auf 47.5° nördlicher Breite mit Gitterpunkten bei 2.5°E , 7.5°E , 12.5°E und 17.5°E . Daraus ergibt sich als Vergleichsgebiet der Sektor $0^\circ\text{E}/50^\circ\text{N} - 20^\circ\text{E}/45^\circ\text{N}$.

Es ist offensichtlich, dass es bei einer solchen Auflösung nicht möglich ist, die räumliche Variabilität detailliert zu untersuchen. Deshalb beschränkt sich diese Arbeit auf den Vergleich der Mittelwerte und Standardabweichungen an den einzelnen Gitterpunkten. Der arithmetische Mittelwert zweier Gitterpunkte über dem zentralen Alpenraum (gegeben durch die Gitterpunkte $7.5^\circ\text{E}/47.5^\circ\text{N}$ und $12.5^\circ\text{E}/47.5^\circ\text{N}$) wurde ebenfalls untersucht (siehe auch Abb. 1).

Da es sich bei den bei der Datenaufbereitung gewonnenen saisonalen Mittelwerten bereits um Mittel einer Stichprobe handelt, konnten für jeden Gitterpunkt normalverteilte Variablen vermutet werden. Dies wurde durch Shapiro-Wilkinson W-Test bestätigt. Lediglich in 3 Fällen (was knapp 5% aller getesteten Mittelwerte entspricht) lag der p-Wert der Nullhypothese (H_0 : Daten sind normalverteilt) im Bereich 0.01–0.03, ansonsten betrug er über 0.05. Für die Zusammenfassung des engeren Alpenraums war der p-Wert nur in einem Fall kleiner als 0.05 (was einer relativen Häufigkeit von 6% entspricht).

Die Daten können also angesichts der geringen Anzahl abgelehnter Nullhypothesen als normalverteilt angenommen werden. Der ebenfalls zu diesem Zweck sehr häufig verwendete Kolmogorov-Smirnoff-Test kam hier nicht zur Anwendung weil er ein konservativer Test ist und bei einem bestimmten Signifikanzniveau eher zur Beibehaltung der Nullhypothese neigt (von Storch und Zwiers, 1999).

Die Mittelwerte werden mit dem Student t-Test auf Übereinstimmung geprüft. Hier wird ebenfalls ein Signifikanzniveau von $\alpha = 0.05$ festgelegt. Dabei kommt ein unverbundener t-Test (d.h. Stich-

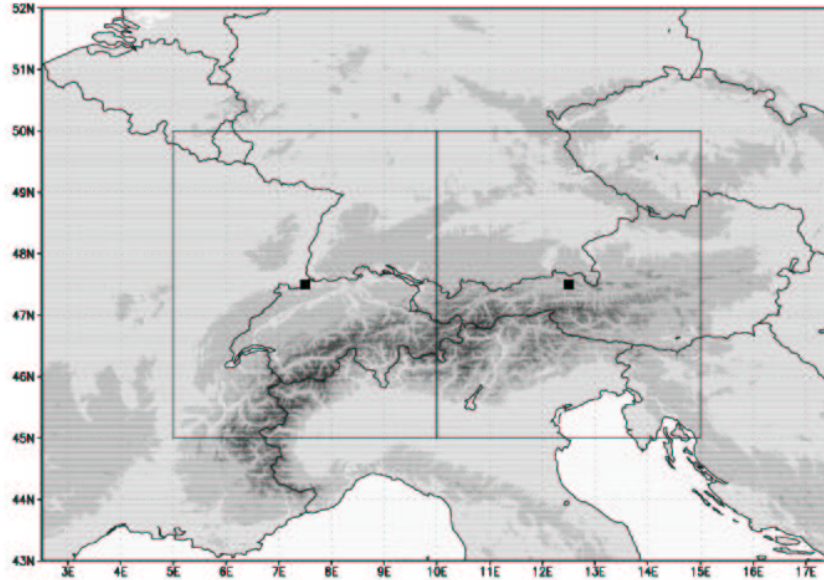


Abbildung 1: Darstellung der beiden Gitterpunkte des $5^\circ \times 5^\circ$ -Gitters über dem zentralen Alpenraum. (Quelle: D. Gyalistras)

proben voneinander unabhängig) mit der Annahme unterschiedlicher Varianzen ($\sigma_1^2 \neq \sigma_2^2$) zur Anwendung.

In einem zweiten Schritt werden die Standardabweichungen der GCMs an den einzelnen Gitterpunkten für jede Jahreszeit mittels F-Test mit den Beobachtungsdaten verglichen (Signifikanzniveau $\alpha = 0.05$). Dies soll einen Eindruck geben, inwieweit die GCMs – unabhängig vom Mittelwert – die interannuelle Variabilität des Niederschlags zu reproduzieren vermögen.

Für den mittleren Niederschlag über dem zentralen Alpenraum wurden dieselben Tests wie eben beschrieben durchgeführt.

3 Resultate

3.1 Vergleich des mittleren saisonalen Niederschlags

Für die saisonalen Mittelwerte wurde für die beiden Gitterpunkte des zentralen Alpenraums gefunden, dass diese lediglich einen leichten Jahresgang aufweisen, mit den geringsten Niederschlägen im Winter und einem herbstlichen Niederschlagsmaximum. Die GCMs überschätzen den Niederschlag hier meist um weniger als 25% (vgl. Abb. 2). Dabei treten die grössten prozentualen (und auch absoluten) Differenzen im Winter auf, die geringsten im Herbst. Signifikante Differenzen ($\alpha = 0.05$) treten daher vor allem im Winter auf, wo keines der Modelle die Messdaten korrekt reproduziert, während im Herbst keines der GCMs eine signifikante Abweichung zu verzeichnen hat.

Das West-Ost-Profil zeigt zunächst ein Ansteigen des Niederschlags und anschliessend das erwartete West-Ost-Gefälle aufgrund der zunehmenden Kontinentalität. Nur der Sommer zeigt ein nahezu umgekehrtes Profil (vgl. Tab. 2). Im Allgemeinen wird der Niederschlag überschätzt, und zwar in der Regel um 25–50%. Die GCMs zeigen im Winter die grössten, im Herbst die kleinsten

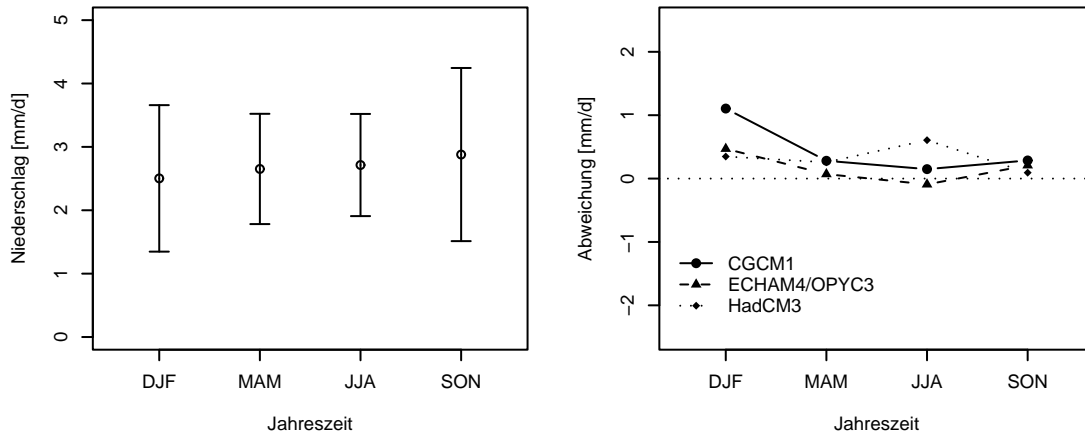


Abbildung 2: Gemessener mittlerer saisonaler Niederschlag der Periode 1961–1990 über dem zentralen Alpenraum (links) mit 95%-Konfidenzintervall und entsprechende Abweichungen (rechts) der untersuchten GCMs.

Abweichungen (maximal +25%, vgl. Abb. 3). Ungeachtet der Jahreszeit ergeben sich die kleinsten Unterschiede für die Gitterpunkte des zentralen Alpenraums (d.h. 2.5°E und 7.5°E). Alle Modelle zeigen jedoch meist signifikante Abweichungen von den Beobachtungsdaten ($\alpha = 0.05$). Am besten vermag das ECHAM4/OPYC3 die Messdaten zu reproduzieren, am schlechtesten ist in diesem Vergleich das CCC1 mit nur vier nicht signifikant abweichenden Mittelwerten. Generell zeigen der Sommer und der Winter die meisten signifikanten Differenzen.

3.2 Interannuelle Variabilität des Niederschlags

Für die interannuelle Variabilität des mittleren Niederschlags wurden an den beiden Gitterpunkten des zentralen Alpenraums im Herbst die grössten und im Sommer die kleinsten Werte berechnet (vgl. Tab. 1). Die meisten GCMs zeigen hier jedoch ein etwas anderes Verhalten. In der Regel wird die Variabilität im Herbst und Winter unterschätzt, im Frühling und Sommer dagegen überschätzt. Die Differenzen zu den Messdaten betragen durchwegs weniger als 50%. Signifikante Abweichungen liessen sich allerdings nur in zwei Fällen nachweisen, nämlich für das CCC1 im Herbst und für das HadCM3 im Winter bei einem Signifikanzniveau von $\alpha = 0.05$ (vgl. Tab. 1).

Auch bei der Betrachtung des West-Ost-Profiles liessen sich keine eindeutigen räumlichen Trends feststellen. Die Abweichungen von der beobachteten Variabilität sind wiederum im Herbst und Winter grösser als im Frühling und Sommer. Ebenso wie bei der obigen Zusammenfassung lagen die Differenzen nahezu durchwegs im Bereich $\pm 50\%$. Häufig wird ein einmal eingenommener Trend der Abweichungen (z.B. immer grösser werdende negative Abweichung) beibehalten. Hier lassen sich nun auch mehr signifikante Abweichungen feststellen. Dabei zeigt das HadCM3 im Winter fast durchwegs signifikante Differenzen. Gesamthaft gesehen weist das ECHAM4/OPYC3 am wenigsten signifikante Differenzen auf (nämlich 2), das HadCM3 am meisten (5 von 16). Das Gesamtbild ergibt im Herbst und Winter die schlechtesten Resultate.

4 Diskussion

Überraschenderweise simulieren fast alle GCMs den Niederschlag über dem Alpenraum deutlich besser als aufgrund der in der Einleitung vorgestellten Studien sowie der komplexen Topographie erwartet werden konnte. Ausserdem lässt sich kein Unterschied zwischen Modellen mit und ohne

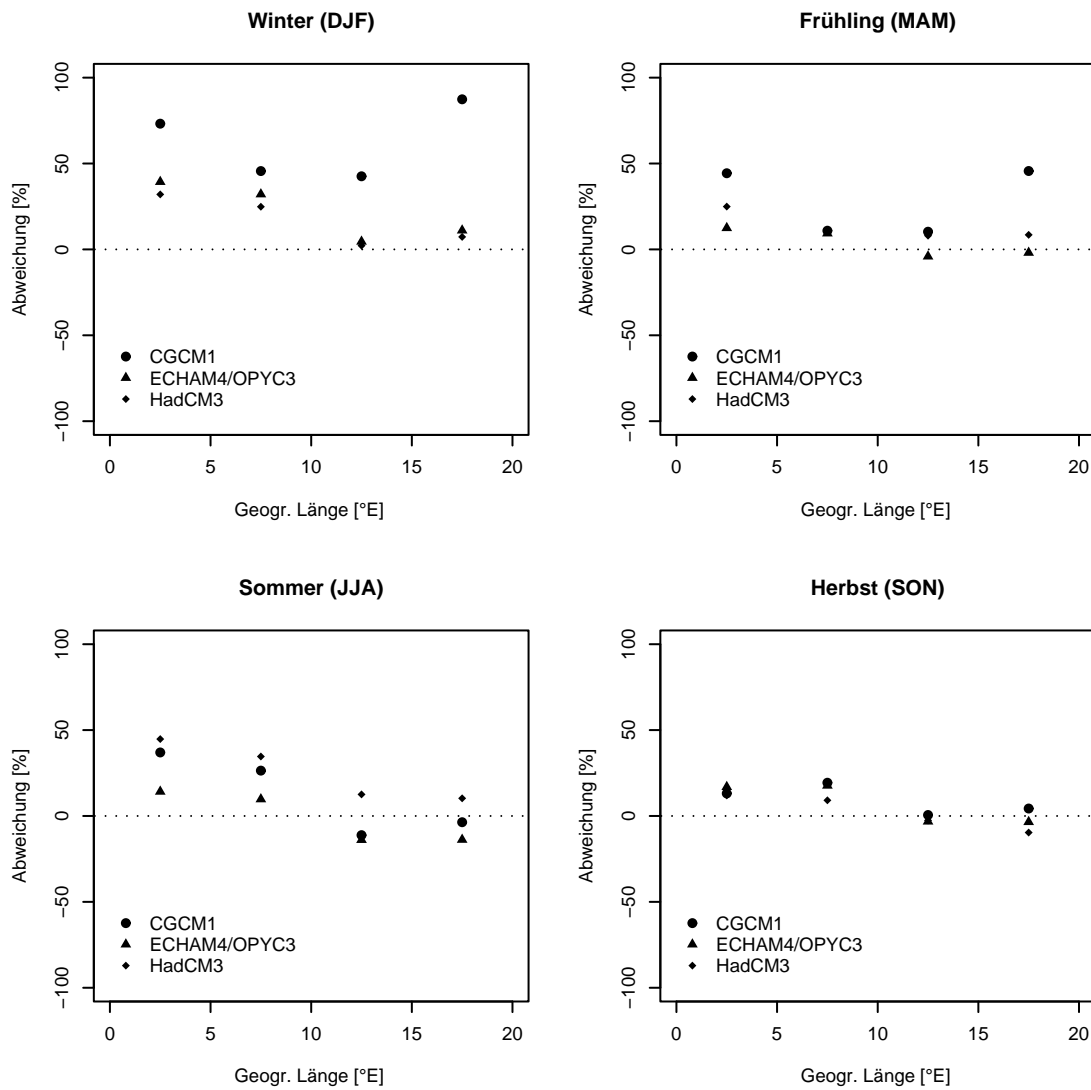


Abbildung 3: Prozentuale Abweichungen des mittleren saisonalen Niederschlags 1961–1990 in den untersuchten GCMs von den Messdaten im Längsschnitt durch den Alpenraum.

Datensatz	Mittelwerte				Standardabweichungen			
	DJF	MAM	JJA	SON	DJF	MAM	JJA	SON
OBS	2.50	2.65	2.71	2.88	0.58	0.44	0.40	0.68
CGCM1	3.61	2.93	2.86	3.17	0.47	0.57	0.32	0.46
ECHAM4	2.97	2.72	2.62	3.09	0.57	0.51	0.32	0.70
HadCM3	2.85	2.91	3.32	2.97	0.35	0.42	0.53	0.52
Datensatz	p-Werte der t-Tests				p-Werte der F-Tests			
	DJF	MAM	JJA	SON	DJF	MAM	JJA	SON
CGCM1	< 0.001	0.036	0.120	0.063	0.296	0.150	0.256	0.040
ECHAM4	0.003	0.568	0.331	0.247	0.939	0.414	0.234	0.895
HadCM3	0.008	0.024	< 0.001	0.554	0.012	0.894	0.138	0.146

Tabelle 1: Mittelwerte und Standardabweichungen im [mm/d] (oben) sowie die p-Werte der t- und F-Tests der Messdaten (OBS) und der untersuchten GCMs für den zentralen Alpenraum.

Flusskorrekturen (d.h. CGCM1 und ECHAM4/OPYC3 einerseits und HadCM3 andererseits) finden. Die Resultate stehen auch in Übereinstimmung mit dem Third Assessment Report (TAR) des IPCC (IPCC, 2001a), dass es kein „bestes“ Modell gibt und deshalb stets die Resultate mehrerer Modelle in eine Analyse einzubeziehen sind. Denn mit Ausnahme des CCC1, welches im Winter und Frühling die schlechtesten Resultate liefert (was durch eine zu grossen Zonalität und einen möglicherweise zu grossen Feuchtetransport nach Osten hin bedingt sein könnte), zeigen das ECHAM4/OPYC3 und das HadCM3 Abweichungen von den Messdaten in der gleichen Grössenordnung.

Die relativ kleine Spannweite der Abweichungen erstaunt insofern, als dass es sich beim Alpenraum um eine Region mit komplexer Topographie handelt und somit aufgrund der groben räumlichen Auflösung der Modelle und damit verbundener grober Reliefdarstellung eigentlich deutlich grössere Abweichungen zu erwarten wären als über grösseren Regionen wie etwa Nordeuropa oder dem Mittelmeerraum. Denn der Niederschlag ist das Endresultat einer Vielzahl physikalischer und stochastischer Prozesse die sich über eine Vielzahl von Skalen erstrecken. Somit kann der Niederschlag auch wesentlich von Prozessen beeinflusst werden, die durch die Maschenweite der GCMs nicht erfasst werden (Lüthi et al., 1996) und deshalb entsprechend parametrisiert werden müssen.

Die interannuelle Variabilität ist einerseits die Folge der grossräumigen Zirkulation und andererseits einer Vielzahl kleinskaliger Prozesse. Im Herbst und Winter dürfte die Variabilität in der Zirkulation der dominierende Steuerungsfaktor der Niederschlagsvariabilität sein. Im Frühling und Sommer, wo ein bedeutender Anteil des Niederschlags durch Konvektionsniederschläge ausgemacht wird, sind eher die kleinskaligen Prozesse von Bedeutung. Die Tatsache, dass die Variabilität im Frühling und Sommer von den Modellen überschätzt, im Herbst und Winter dagegen unterschätzt wird könnte unter anderem auch an der Art und Weise der Parametrisierungen des Feuchteflusses Boden-Atmosphäre und der Konvektion liegen.

4.1 Vergleich mit anderen Studien

Giorgi und Francisco (2000b in: IPCC 2001b) fanden für mehre sub-kontinentale Regionen im Fall von Nordeuropa Abweichungen für die drei Modelle (wobei hier noch das Vorgängermodell HadCM2 untersucht wird) im Winter von +40% (ECHAM4/OPYC3 und HadCM2) bis +50% (CGCM1) und im Sommer von -20% (ECHAM4/OPYC3) bis +15% (CGCM1 und HadCM2), für den Mittelmeerraum betragen die entsprechenden Abweichungen im Winter 0% (ECHAM4/OPYC3) bis +15% (CGCM1 und HadCM2) und im Sommer -20% (CGCM1) bis +10% (HadCM2). In einer Untersuchung mehrerer HadCM2-Szenarien (Giorgi und Francisco, 2000a) für dieselben Regionen wurde eine allgemein gute Übereinstimmung der Mittelwerte mit den Messdaten gefunden (im Sommer besser als im Winter), wobei der Niederschlag generell überschätzt wurde. Die interannuelle Variabilität betrachten die Autoren allerdings als schlecht simuliert, wobei der Mittelmeerraum und Nordeuropa wiederum mit zu den am besten simulierten Gebieten gehören (Abweichungen in

Datensatz	Länge	Mittelwerte				Standardabweichungen			
		DJF	MAM	JJA	SON	DJF	MAM	JJA	SON
OBS	2.5	2.23	2.12	1.77	2.39	0.50	0.49	0.49	0.72
	7.5	2.59	2.65	2.41	2.87	0.64	0.51	0.46	0.78
	12.5	2.42	2.65	3.02	2.88	0.56	0.46	0.42	0.67
	17.5	1.80	2.24	2.83	2.35	0.50	0.51	0.52	0.54
CGCM1	2.5	3.86	3.06	2.42	2.70	0.57	0.52	0.48	0.39
	7.5	3.77	2.94	3.04	3.43	0.54	0.56	0.37	0.47
	12.5	3.45	2.92	2.68	2.90	0.45	0.64	0.34	0.51
	17.5	3.37	3.26	2.73	2.46	0.41	0.67	0.52	0.40
ECHAM4	2.5	3.11	2.38	2.02	2.79	0.75	0.66	0.46	0.68
	7.5	3.42	2.90	2.64	3.38	0.70	0.60	0.40	0.81
	12.5	2.53	2.54	2.6	2.79	0.48	0.44	0.32	0.65
	17.5	2.00	2.20	2.44	2.27	0.38	0.38	0.31	0.62
HadCM3	2.5	2.94	2.65	2.56	2.67	0.45	0.52	0.60	0.57
	7.5	3.23	2.96	3.24	3.14	0.43	0.46	0.58	0.57
	12.5	2.47	2.86	3.40	2.81	0.34	0.44	0.55	0.53
	17.5	1.93	2.43	3.12	2.13	0.35	0.39	0.73	0.46
Datensatz	Länge	p-Werte der t-Tests				p-Werte der F-Tests			
		DJF	MAM	JJA	SON	DJF	MAM	JJA	SON
CGCM1	2.5	< 0.001	< 0.001	< 0.001	0.041	0.525	0.683	0.941	0.002
	7.5	< 0.001	0.042	< 0.001	0.002	0.356	0.633	0.246	0.009
	12.5	< 0.001	0.065	0.001	0.917	0.234	0.089	0.241	0.140
	17.5	< 0.001	< 0.001	0.445	0.410	0.300	0.127	0.949	0.115
ECHAM4	2.5	< 0.001	0.082	0.045	0.028	0.040	0.108	0.799	0.756
	7.5	< 0.001	0.091	0.040	0.016	0.663	0.395	0.435	0.817
	12.5	0.425	0.360	< 0.001	0.594	0.400	0.803	0.136	0.822
	17.5	0.092	0.712	< 0.001	0.587	0.157	0.127	0.007	0.464
HadCM3	2.5	< 0.001	< 0.001	< 0.001	0.094	0.571	0.703	0.262	0.238
	7.5	< 0.001	0.020	< 0.001	0.142	0.039	0.605	0.244	0.097
	12.5	0.666	0.077	0.004	0.636	0.009	0.789	0.162	0.205
	17.5	0.253	0.109	0.081	0.086	0.077	0.165	0.067	0.428

Tabelle 2: Mittelwerte und Standardabweichungen in [mm/d] (oben) sowie die p-Werte der t- und F-Tests der Messdaten (OBS) und der untersuchten GCMs für den Längsschnitt durch die Alpen.

Winter bis +35% und im Sommer bis +30%). Flato et al. (2000) konnten in einer Analyse eines 200-jährigen Kontrolllaufs mit dem CGCM1 sowohl für den Niederschlag als auch für die Temperatur eine gute Übereinstimmung für das globale Mittel wie auch für fünf ausgewählte Regionen zeigen. Auch hier waren die Abweichungen im Winter grösser als im Sommer.

Eine Bewertung der Resultate nach dem IPCC-Schema (IPCC 2001a) müsste für die hier gefundenen Resultate zwischen „well established“ und „evolving“ liegen, denn die Modelle vermögen die Mittelwerte – obwohl immer noch signifikante Abweichungen auftreten – für den Mittelwert der beiden Gitterpunkte über dem Alpenraum recht gut zu modellieren. Auf der Ebene der einzelnen Gitterpunkte betrachtet werden der Frühling und Herbst ebenfalls gut modelliert, grössere Abweichungen treten jedoch im Winter und Sommer auf.

4.2 Qualität der Messdaten und Vergleichsmethodik

Die Messdaten als solche erscheinen plausibel, obwohl sich deren Interpretation schwierig gestaltet, da verschiedene Niederschlagsregimes (etwa Alpennord- und Südseite, West- und Osteuropa) in den einzelnen Flächen gemittelt werden. Einen guten Überblick zum Thema Niederschlagsregimes geben etwa Weischet und Endlicher (2000).

Eine wesentliche Unsicherheit dieser Analyse ist die Qualität der interpolierten Messdaten. Ein erstes Problem besteht in der räumlichen Ausdehnung des Datensatzes. Denn der hier verwendete Datensatz von Schmutz (2001a) erstreckt sich über ein deutlich kleineres Gebiet ($2.1^{\circ}\text{E} - 18.9^{\circ}\text{E}$) als die GCM-Daten ($0^{\circ}\text{E} - 20^{\circ}\text{E}$). Dadurch ergeben sich zwangsläufig insbesondere beim westlichsten Gitterpunkt (2.5°E) Fehler in der Interpolation des Messdatensatzes. Dies wäre sicher auch eine Ursache dafür, dass die beiden Gitterpunkte des zentralen Alpenraums sowohl gemittelt wie auch einzeln betrachtet kleinere Fehler aufweisen als der westlichste und östlichste Gitterpunkt. Das wohl grösste Problem stellt jedoch der instrumentelle Niederschlagsmessfehler dar. Bekanntlich wird wegen Benetzungs- und Verdunstungseffekten sowie infolge Windeinfluss zu wenig Niederschlag gemessen, wobei letzterer Effekt den wohl grössten Anteil am Fehler trägt. Tritt der Niederschlag in Form von Schnee auf, so vergrössert sich der Windeffekt beträchtlich. Gesamthaft gesehen ist der Fehler besonders gross bei Gebirgsstationen im Winter und kann bis zu 50% betragen, typische Werte liegen allerdings im Bereich 5 – 15% (Scheppeler, 2000). Dies könnte zu einem gewissen Teil die besonders grossen Abweichungen der Modelle im Winter erklären, weil die Messdaten in der Regel nicht korrigiert werden.

Die Feststellung, dass die Modelle das Mittel der Gitterpunkte des Alpenraums besser darstellen als das Mittel einzelner Gitterpunkte deutet auch daraufhin, dass sich die Analyse von GCMs normalerweise über mehrere Gitterpunkte erstrecken sollte, da hier eher zufällige Fehler einzelner Gitterpunkte etwas gedämpft werden. Hier zeigt sich auch deutlich die Problematik des angewandten Testverfahrens. Mit dem t-Test wird die Signifikanz eines Unterschieds zweier Mittelwerte zwar sehr zuverlässig festgestellt, aber angesichts des teilweise erheblichen Messfehlers sind entsprechende Vorbehalte anzubringen. Dies impliziert nicht zuletzt auch das Bedürfnis nach einem Messdatensatz, in welchem die entsprechenden Fehler berücksichtigt werden.

5 Schlussfolgerungen

Die 3 untersuchten GCMs simulieren den Niederschlag auf der Ebene einzelner Gitterpunkte deutlich besser als ursprünglich angenommen. Die Abweichungen liegen etwa im Rahmen dessen, was in Studien auf sub-kontinentaler Ebene festgestellt wurde (vgl. etwa Giorgi und Francisco, 2001b). Der mittlere saisonale Niederschlag wird generell überschätzt und wird im Winter am schlechtesten, im Herbst am besten modelliert. Im Osten stimmen die simulierten Niederschläge besser mit den Messwerten überein als im Westen der Alpen. Das ECHAM4/OPYC3 vermag den saisonalen Niederschlag über dem Alpenraum am besten zu simulieren, gefolgt vom HadCM3. Das CCC1 schneidet in diesem Vergleich am schlechtesten ab.

Die Differenzen zu den Messdaten sind immer noch gross und betragen für das Mittel zweier Gitterpunkte im zentralen Alpenraum etwa +25%. Im West-Ost-Profil auf der Ebene einzelner

Gitterpunkte sind diese teilweise deutlich grösser und betragen bis zu +85%. Mindestens die Hälfte der Abweichungen von den Messdaten ist signifikant ($\alpha = 0.05$). Die interannuelle Variabilität wird meistens richtig geschätzt, signifikante – in allen Jahreszeiten tendenziell negative – Abweichungen treten vor allem im Winter auf.

Das verwendete Testverfahren ist allerdings sehr streng, da die grösste Fehlerquelle, nämlich der instrumentelle Niederschlagsmessfehler, nicht in die Analyse mit einfließt. Dieser systematische Bias führt insbesondere im Winter zu einem deutlich vergrösserten Fehler erster Art (falsche Ablehnung von H_0 : Mittelwerte aus der gleichen Stichprobe). Zudem umfasst der Messdatensatz einen kleineren räumlichen Ausschnitt als die GCM-Datensätze, was im Westen und Osten zu Fehlern führt.

Es kann jedoch nicht erklärt werden, weshalb die Modelle insbesondere die interannuelle Variabilität dermassen gut wiedergeben können. Einziger Anhaltspunkt ist hier der doch sehr kleine Stichprobenumfang. Deshalb wäre es in einem weiteren Schritt denkbar, einerseits die vorliegende Arbeit mit weiteren Modellresultaten zu ergänzen und andererseits die Zirkulation auf sub-kontinentaler Ebene ebenfalls mit entsprechenden Messdaten zu untersuchen.

Literatur

- Busuioc, A., H. von Storch und R. Schnur (1999). Verification of GCM-Generated Regional Seasonal Precipitation for Current Climate and Statistical Downscaling. *J. Clim.* **12**, 258-272.
- CMIP (The Coupled Model Intercomparison Project) (2002). *Summary Documentation: CMIP Model Features and Experimental Implementation (Version 1.2)*. 15. Mai 2002.
<<http://www-pcmdi.llnl.gov/modeldoc/cmip/>>
- Deutsches Klimarechenzentrum (DKRZ) (2000). The control integration of Max-Planck-Institut. *The ECHAM4/OPYC3 Control Run from MPI*. 16. März 2002.
<http://www.dkrz.de/ipcc/ddc/info/Max-Planck-Institut/Readme.control_run>
- Flato, G.M., G.J. Boer, W.G. Lee, N.A. McFarlane, D. Ramsden, M.C. Reader, und A.J. Weaver (2000). The Canadian Centre for Climate Modeling and Analysis global coupled model and its climate. *Clim. Dyn.* **16**, 451-467.
- Frei, C. und C. Schär (1998). A Precipitation Climatology of the Alps from High-Resolution Rain-Gauge Observations. *Int. J. Climatol.* **18**, 873-900.
- Giorgi, F. und R. Francisco (2000a). Uncertainties in regional climate change prediction: A regional analysis of ensemble simulations with the HADCM2 coupled AOGCM. *Clim. Dyn.* **16**, 169-182.
- Giorgi, F. und R. Francisco (2000b). Evaluating uncertainties in the prediction of regional climate change. *Geophys. Res. Lett.* **27**, 1295-1298.
- Gordon, C., C. Cooper, C.A. Senior, H. Banks, J.M. Gregory, T.C. Johns, J.F.B. Mitchell und R.A. Wood (2000). The simulation of SST, sea ice extents and ocean heat transports in a version of the Hadley Centre coupled model without flux adjustments. *Clim. Dyn.* **16**, 147-168.
- Gyalistras, D. (2000). *Zur zukünftigen Entwicklung des Klimas im Alpenraum und in der Schweiz*. In: Wanner, H., D. Gyalistras, J. Luterbacher, R. Rickli, E. Salvisberg und C. Schmutz (2000). *Klimawandel im Schweizer Alpenraum*. Zürich: vdf, Hochschulverlag an der ETH.
- Gyalistras, D., C. Schär, H.C. Davies und H. Wanner (1998). *Future Alpine Climate*. In: Cebon, P., U. Dahinden, H. Davies, D.M. Imboden und C.C. Jaeger (Hrsg.) (1998). *Views from the Alps. Regional Perspectives on Climate Change*. Cambridge, Massachusetts und London, England: The MIT Press.
- IPCC (2001a). McAvaney, B.J., C. Covey, S. Joussaume, V. Kattsov, A. Kitoh, W. Ogana, A.J. Pitman, A.J. Weaver, R.A. Wood, Z.-C. Zhao et al. *Model Evaluation*. In: Houghton, J.T., Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P.J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell, C.A. Johnson (Hrsg.). *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, UK und New York, USA: Cambridge University Press.
- IPCC (2001b). Giorgi, F., B. Hewitson, J. Christensen, M. Hulme, H. von Storch, P. Whetton, R. Jones, L. Mearns, C. Fu et al. *Regional Climate Information - Evaluation and Projections*. In: Houghton, J.T., Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P.J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell, C.A. Johnson

- (Hrsg.). *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, UK und New York, USA: Cambridge University Press.
- Kittel, T.G.F., F. Giorgi und G.A. Meehl (1998). Intercomparison of regional biases and doubled CO₂-sensitivity of coupled atmosphere-ocean general circulation model experiments. *Clim. Dyn.* **14**, 1-15.
- Lenzen, P. (1996). *The PINGO package*. Release 1.1. 16. März 2002.
<<http://www.dkrz.de/forschung/reports/report11-1.1/pingo-1.html>>
- Lüthi, D., A. Cress, H.C. Davies, C. Frei und C. Schär (1996). Interannual Variability and Regional Climate Simulations. *Theor. Appl. Climatol.* **53**, 185-209.
- Roeckner, E., J.M. Oberhuber, A. Bacher, M. Christoph, I. Kirchner (1996). ENSO variability and atmospheric response in a global coupled atmosphere-ocean GCM. *Clim. Dyn.* **12**, 737-754.
- Scheppler, P. (2000). *Schneedeckenmodellierung und Kalibrationsmöglichkeiten für ausgewählte Beobachtungsstationen*. Diplomarbeit. Geographisches Institut, Universität Bern.
- Schmidli, J., C. Frei und C. Schär (2001). Reconstruction of Mesoscale Precipitation Fields from Sparse Observations in Complex Terrain. *J. Clim.* **14**, 3289-3306.
- Schmidli, C. und C. Schmutz (2001). Mesoscale precipitation in the Alps during the 20th century. In Vorbereitung.
- Schmutz, C. (2001a). *Low Frequency Climate and Precipitation Variability in the Alpine Region*. Dissertation. Geographisches Institut, Universität Bern.
- Schmutz, C. (2001b). A Quality Tested Precipitation Data Base of Monthly Alpine Long-Term (1901-1995) Precipitation Time Series. *Theoretical and Applied climatology*, eingereicht. In: Schmutz, C. (2001a). *Low Frequency Climate and Precipitation Variability in the Alpine Region*. Dissertation. Geographisches Institut, Universität Bern.
- Schmutz, C., H. Wanner und D. Gyalistras (2001). Atmospheric Regimes and Low Frequency Precipitation Variability in the European Alps in the Twentieth Century. Einzureichen. In: Schmutz, C. (2001a). *Low Frequency Climate and Precipitation Variability in the Alpine Region*. Dissertation. Geographisches Institut, Universität Bern.
- Von Storch, H. und W.F. Zwiers (1999). *Statistical analysis in climate research*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Weischet, W., und W. Endlicher (2000). *Regionale Klimatologie – Teil 2. Die Alte Welt*. Reihe Teubner Studienbücher der Geographie. Stuttgart, Leipzig: B.G. Teubner.
- Widmann, M. und C.S. Bretherton (2000). Validation of Mesoscale Precipitation in the NCEP Reanalysis Using a New Gridcell Dataset for the Northwestern United States. *J. Clim.* **13**, 1936-1950.