

4.4. Klimaszenarien für den Alpenraum und die Schweiz: Neuester Stand und Vergleich

4.4.1. Einleitung

Wie könnte sich das Klima den Alpen in den nächsten Jahrzehnten verändern? Da die Entwicklung des globalen Klimas grundsätzlich unsicher ist, kann auf diese Frage keine einfache Antwort gegeben werden. Ausgehend von plausiblen Annahmen für die zukünftige globale sozio-ökonomische Entwicklung (Aufstellung von Emissionsszenarien) ist es jedoch möglich, physikalisch mehr oder weniger konsistente Szenarien für das zukünftige Klima der Alpen herzuleiten. Zur Berechnung solcher regionaler Klimaszenarien stehen verschiedene Verfahren zur Verfügung, wobei die physikalisch konsistentesten Szenarien auf Simulationen mit globalen Zirkulationsmodellen (GCM) aufbauen (z. B. Giorgi und Mearns 1991, Carter et al. 1994). Aus diesem Grund werden wir uns in diesem Abschnitt ausschliesslich mit GCM-basierten Szenarien befassen.

Die gängigen atmosphärischen GCMs haben typische Gitterpunktabstände von einigen 100 km, so dass die komplexe Topographie der Alpen in den Modellen nur sehr grob dargestellt ist. Zudem ist die räumliche und zeitliche Präzision der Modelle beschränkt, was zur Folge hat, dass auf der Skala von einzelnen Gitterpunkten in der Regel keine zuverlässigen Resultate erhalten werden (z. B. Grotch und MacCracken 1991, Hulme et al. 1993). Um regionale Klimaszenarien abzuschätzen, müssen somit die von den GCMs simulierten, grossräumigen Klimaveränderungen in einem separaten Schritt auf die regionale Skala übersetzt werden (sogenannte «Klimaregionalisierung» oder «Downscaling»; z. B. von Storch 1995).

Eine erste Möglichkeit zur Klimaregionalisierung besteht in der Verwendung globaler Modelle, die über dem ganzen Globus (z. B. Bengtsson et al. 1995) oder nur über der interessierenden Region (z. B. Déqué et al. 1998) eine hohe horizontale Auflösung aufweisen und mit den Resultaten aus einer grob aufgelösten GCM-Simulation angetrieben werden («Zeitscheibenexperimente»). Zwei weitere Möglichkeiten sind die Einbettung eines regionalen Klimamodells (RegCM) in ein globales Modell (z. B. Giorgi et al. 1992, Rotach et al. 1997), oder die Ermittlung des regionalen Klimas als gewichtetes Mittel regionaler Klimazustände, die mit einem RegCM für typische Wetterlagen oder Wetterepisoden aus einem GCM-Lauf berechnet werden (z. B. Frey-Buness et al. 1995, Fuentes et al., 1998). Eine letzte Möglichkeit besteht schliesslich in der Verwendung statistischer Transferfunktionen, die es

erlauben, Veränderungen in regionalen oder lokalen Klimaparametern aus Veränderungen des grossräumigen Klimazustands abzuschätzen (z. B. Kim et al. 1984, von Storch et al. 1993). Eine ausführliche Diskussion der Vor- und Nachteile der verschiedenen Verfahren sowie deren Eignung für Klimawirkungsstudien in den Alpen kann in Gyalistras et al. (1998) und Gyalistras und Fischlin (1999) nachgelesen werden.

Die bisher vollständigste Übersicht von Klimaszenarien für den Alpenraum ist unseres Wissens in Gyalistras et al. (1998) zu finden. Die in dieser Arbeit untersuchten, GCM-basierten Szenarien weisen klar auf eine zukünftige Temperaturerhöhung im Alpenraum hin, die für den Fall einer CO₂-Verdopplung und im Mittel über das ganze Jahr und den gesamten Alpenbogen, je nach Szenario zwischen 1.2 und 3.5 °C betragen könnte. Für die 2xCO₂-Sensitivität des jahres- und gebietsmittleren Niederschlags ergab sich eine Spannbreite zwischen -5 und +25%. Die Szenarien zeigten, dass je nach Klimaparameter, Region und Jahreszeit mit stark variierenden Veränderungen zu rechnen ist.

Die Auswertung von Gyalistras et al. (1998) berücksichtigte jedoch nur eine relativ kleine Anzahl von GCM-Simulationen, so dass bei den oben angegebenen Intervallen die tatsächlichen Unsicherheiten bei der Modellierung der globalen Klimaveränderung (siehe Kapitel 4.2.) wohl eher unterschätzt wurden. Zudem basiert der Szenarienvergleich von Gyalistras et al. (1998) auf einer sehr heterogenen und unvollständigen (z. B. im Hinblick auf die räumliche und jahreszeitliche Abdeckung) Datenbank. Auch entsprach die Arbeit dem Forschungsstand von zirka 1996, so dass nur eine einzige Simulation mit einem voll gekoppelten atmosphärisch-ozeanischen GCM (AOGCM) berücksichtigt wurde. Schliesslich wurde in keiner der betrachteten Studien der kühlende Effekt der Aerosole miteinbezogen.

In diesem Unterkapitel wird erstens eine Bestandesaufnahme der heute verfügbaren Klimaszenarien für den Alpenraum erstellt. Unser Ziel ist es dabei, die bestehenden Unsicherheiten bei der Abschätzung des zukünftigen Klimas zu erkunden sowie mögliche Wissenslücken aufzufindig zu machen. Zweitens sollen die seit zirka 1996 neu hinzugekommenen Szenarien näher vorgestellt werden. Schliesslich sollen die verfügbaren Szenarien kritisch diskutiert und dazu verwendet werden, die klimatische Sensitivität des Alpenraums auf die zu erwartende globale Erwärmung quantitativ abzuschätzen.

4.4.2. Material und Methoden

Auswahl der Szenarien

Mittlerweile ist eine Vielzahl von Simulationen mit globalen und regionalen Klimamodellen, die den Alpenraum einschliessen, durchgeführt worden. Viele dieser Resultate können in digitaler Form von der Website des IPCC Data Distribution Centre (IPCC DDC, <http://ipcc-ddc.cru.uea.ac.uk>) heruntergeladen werden. Die Auswertung all dieser Daten würde jedoch den Rahmen der vorliegenden Studie sprengen. Hier beschränken wir uns daher auf die Vorstellung bereits publizierter Szenarien sowie einiger neuerer Resultate aus der eigenen Forschung.

Die Mehrzahl der uns zur Verfügung stehenden Studien berücksichtigte mögliche Veränderungen in den langjährigen Erwartungswerten der annuell oder saisonal gemittelten Temperatur und des Niederschlags. Einige Arbeiten enthielten Szenarienangaben auch zu anderen Statistiken, wie zum Beispiel die Tag-zu-Tag-Variabilität des Wetters (Gyalistras et al. 1994, Riedo et al. 1999) und Klimavariablen, wie z. B. die Anzahl Niederschlagstage, die relative Feuchte und die Strahlung (Gyalistras et al. 1994 und 1997, Wild et al. 1997). Auf diese Arbeiten wird hier aus Platzgründen nicht näher eingegangen. Soweit vorhanden, werden wir jedoch auf Szenarienangaben für die extremen Niederschlagsereignisse eingehen.

Szenarien aus globalen Klimamodellen

Wie bereits erwähnt wurde geben GCMs an einzelnen Gitterpunkten in der Regel keine sehr vertrauenswürdigen Resultate. Auf der Skala von mehreren Gitterpunkten können die Modelle jedoch durchaus zuverlässige Informationen liefern (z. B. Widmann und Bretherton 2000). Da die meisten neueren GCMs einen Gitterpunkt Abstand von 200–300 km aufweisen, ist es daher von Interesse, die mittlere Reaktion der Modelle über das gesamte Alpengebiet (West-Ost-Ausdehnung ca. 800 km) zu ermitteln.

Machenhauer et al. (1998) untersuchten die Simulation des heutigen Klimas durch die HadCM2- und ECHAM4+OPYC3-AOGCMs über einzelnen europäische Regionen, darunter auch den Alpen. In einem zweiten Schritt analysierten sie dann die Resultate von zwei Szenarienrechnungen mit dem HadCM2- und einer weiteren Rechnung mit dem ECHAM4+OPYC3-Modell.

Die beiden HadCM2-Experimente deckten den Zeitraum 1860 bis 2090 ab (Mitchell und Johns 1997, Simulationen Nr. 32 und 33 in Tab. B2). In der ersten Simulation wurde bis 1990 ein kontinuierlicher Anstieg des äquivalenten CO₂-Gehalts gemäss Beobachtungen und ab 1990 um 1% pro Jahr angenommen. Analysiert wurden die simulierten mittleren Veränderungen aus 10 Jahren um das Jahr 2060, relativ zu 10 Jahren um das Jahr 1990. In diesem Beitrag wird für dieses Szenario die Bezeichnung *HAD2/GHG/2060–1990* verwendet.

In der zweiten HadCM2-Simulation wurde zusätzlich der direkte Effekt der Sulfataerosole berücksichtigt. Das verwendete Forcing basierte bis 1990 auf Schätzungen historischer Sulfat-Emissionen und ab 1990 auf dem IPCC-Szenario IS92a. Bei dieser Simulation analysierten Machenhauer et al. (1998) die mittleren Veränderungen aus 30 Jahren um das Jahr 2020, relativ zu 30-jährigen Mitteln aus einer Kontrollsimulation mit einem auf dem Stand von 1950 festgehaltenen äquivalenten CO₂-Gehalt (Szenario *HAD2/SUL/2020–1950*).

Die ECHAM4+OPYC3-Simulation erstreckte sich von 1860 bis 2100 (Roegner et al. 1999, Simulation Nr. 24 in Tab. B2). Hier wurde bis 1990 ein stetiger Anstieg der Konzentrationen von CO₂, CH₄, N₂O und anderen Treibhausgasen gemäss Beobachtungen und ab 1990 wieder ein Anstieg gemäss dem IPCC-Szenario IS92a angenommen. Der Effekt der Sulfataerosole wurde nicht berücksichtigt. Analysiert wurden die Veränderungen aus 9 Jahren um das Jahr 2075, relativ zu 9 Jahren um das Jahr 1990 (Szenario *ECH4/GHG/2075–1990*).

Eine weitere Analyse von GCM-Resultaten für den Alpenraum findet sich bei Burkhardt (1995 und 1999). Untersucht wurde der Winterniederschlag in einem Zeitscheibenexperiment mit dem ECHAM3(T42)-AGCM, wobei die Randbedingungen für das zukünftige Klima einer IPCC «Business-As-Usual»-Simulation mit dem ECHAM1+LSG-AOGCM entnommen wurden (Cubasch et al. 1995, Perlwitz 1997, Simulation Nr. 22 in Tab. B2). Simuliert wurden je 30 Jahre um das Jahr 1980 (1xCO₂) und 2080 (3xCO₂) (Szenario *ECH1/GHG/2080–1980+ECH3(T42)*).

Szenarien aus Simulationen mit hochauflösenden Klimamodellen

Die typische horizontale Auflösung der bisher durchgeführten Simulationen mit räumlich hochaufgelösten, globalen oder regionalen Klimamodellen beträgt zirka 50 km. Dies würde im Prinzip das Studium von Klimaveränderungen in groben Teilregionen der Alpen (z. B. Alpennord- vs. Alpensüdseite;

Gyalistras et al. 1998) zulassen. Die meisten bisher durchgeführten quantitativen Analysen beziehen sich jedoch auf Gebietsmittelwerte über dem gesamten Alpenbogen.

Machenhauer et al. (1998) benutzten die oben erwähnten Simulationen mit den HadCM2- und ECHAM4+OPYC3-AOGCMs für Regionalisierungsstudien mit drei verschiedenen, räumlich hochaufgelösten Klimamodellen. Benutzt wurden das HadRM2-RegCM (Jones et al. 1995, Noguer et al. 1998, horizontale Auflösung 50 km), das ARPEGE-GCM (Déqué et al. 1998, Simulation Nr. 4 in Tab. B2, räumlich variable horizontale Auflösung, maximal zirka 60 km über Europa), sowie das HIRHAM4-RegCM (Christensen et al. 1996, Christensen et al. 1997, horizontale Auflösung 55 km). Für die erhaltenen Szenarien werden im Weiteren die Bezeichnungen *HAD2/SUL/2020–1950+HadRM2*, *HAD2/GHG/2060–1990+ARPEGE* und *ECH4/GHG/2075–1990+HIRHAM4* verwendet.

Die globale ECHAM4+OPYC3/GHG-Simulation wurde auch in der RegCM-Studie von Heimann und Sept (1998) verwendet. Hier wurde das mittlere Sommerklima der Jahre 2071–2100 im Vergleich zur Referenzperiode 1971–2000 betrachtet. Die Studie basierte auf dem von Fuentes et al. (1998) vorgeschlagenen statistisch-dynamischen Verfahren und verwendete das REWIH3D-RegCM (Heimann 1994), das in zwei Schritten zuerst mit einer horizontalen Auflösung von 80 km und dann von 20 km betrieben wurde. In einer weiteren Untersuchung mit der gleichen Modellkonfiguration berechneten Heimann et al. (1998) auch ein sommerliches Szenario für einen kleineren Ausschnitt der Alpen, der lediglich Bayern und Teile Österreichs und der Schweiz einschloss. Das von Heimann und Sept (1998) angegebene Szenario wird im Weiteren als *ECH4/GHG/2085–1985+2xREWIH3D* bezeichnet.

Giorgi et al. (1997) führten über Europa eine Simulation mit dem RegCM2-Modell (Giorgi et al. 1993a und b, Giorgi und Marinucci 1996, horizontale Auflösung 50 km) durch, das in das CSCO2-AGCM (Washington und Meehl, 1993, siehe auch Simulation Nr. 12 in Tab. B2) eingebettet wurde. Das AGCM war an ein Mischungsschicht-Ozeanmodell gekoppelt, und es wurden 5 Jahre unter $1xCO_2$ - und 3 Jahre unter $2xCO_2$ -Bedingungen gerechnet. Für dieses Szenario wird im Weiteren die Bezeichnung *CSCO2/2xCO₂+RegCM2* verwendet.

Von einer weiteren regionalen Klimasimulation, die den Alpenraum einschliesst, wird in Jones et al. (1997) berichtet. Verwendet wurde das HadRM2-Modell (horizontale Auflösung zirka 50 km), das mit Daten vom UKMO-AGCM (Mitchell und Johns, 1997, siehe auch Simulation Nr. 33 in Tab. B2) angetrieben wurde. In dieser Studie wurde allerdings im Gegensatz

zu den weiter oben erwähnten HAD2/GHG- und HAD2/SUL-Szenarien das AGCM lediglich an ein Mischungsschicht-Ozeanmodell gekoppelt. Simuliert wurden je 10 Jahre unter $1xCO_2$ - und $2xCO_2$ -Bedingungen (Szenario *UKMO/2xCO₂+HadRM2*).

Eine weitere RegCM-Studie über Europa, die keine eigentliche Szenario-rechnung darstellt, aber im Zusammenhang mit der Klimaveränderung von Interesse ist, wurde von Frei et al. (1998) durchgeführt. Hier wurde das RegCM nicht in ein GCM eingebettet, sondern gemäss der von Schär et al. (1996) vorgeschlagenen Methode als Randbedingung lediglich mit systematisch abgeänderten grossräumigen Messdaten angetrieben. Spezifisch wurde im Sinne einer Sensitivitätsstudie angenommen, dass sich die Lufttemperatur über dem Nordatlantik und Europa in allen Höhengniveaus gleichmässig um 2 K erwärmt und dass dabei, im Einklang mit den Resultaten globaler Klimasimulationen (z. B. Mitchell und Ingram 1992), die relative Feuchte in der Atmosphäre konstant bleibt (d. h. Erhöhung der absoluten Feuchte). Ansonsten wurden keine weiteren Veränderungen, insbesondere keine systematischen Veränderungen der atmosphärischen Zirkulation, angenommen. Verwendet wurde das regionale Klimamodell von Lüthi et al. (1996; horizontale Auflösung 56 km) und es wurden je fünf Oktober unter heutigen und wärmeren Randbedingungen simuliert. Für diese Studie verwenden wir im Weiteren die Bezeichnung *SENS2K*.

Szenarien aus statistischen Regionalisierungsmethoden

Die statistische Regionalisierung beruht auf gemessenen Zusammenhängen zwischen gross- und kleinräumigen Variablen, so dass im Gegensatz zu den GCM- und RegCM-Simulationen regionale Szenarien zunächst nur für langjährige Klimastationen hergeleitet werden können. Mithilfe von zusätzlichen Daten aus umliegenden Messstationen sowie statistischen Interpolationsverfahren können jedoch selbst für den topographisch komplexen Alpenraum flächendeckende Szenarien mit einer hohen räumlichen Auflösung abgeschätzt werden (Gyalistras et al. 1998, Gyalistras und Fischlin 1999).

Das unseres Wissens bisher einzige statistisch erstellte Szenario, das den gesamten Alpenraum abdeckt, wurde von Burkhardt (1999) berechnet. Als grossräumiger Prädiktor diente das monatlich gemittelte 500 hPa Geopotentialfeld (Z500) über Europa, um mögliche Veränderungen des Winterniederschlags an 16 zentraleuropäischen Standorten abzuschätzen. Verwendet wurde ein multivariates, lineares Regressionsmodell, das mittels der kanonischen Korrelationsanalyse (CCA) aus den monatlichen grossräumigen und regionalen Messreihen ermittelt wurde. Das von Burkhardt (1999) angegebene

ne Szenario basierte auf dem bereits weiter oben vorgestellten Zeitscheibenexperiment mit dem ECHAM3(T42)-AOGCM (Simulation Nr. 22 in Tab. B2) und wird im Weiteren als *ECH1/GHG/2080–1980+ECH3(T42)+CCA(Z500)* bezeichnet.

Für die Schweiz sind in den letzten Jahren mehrere statistisch regionalisierte Szenarien erstellt worden. Die meisten dieser Szenarien wurden mittels der von Gyalistras et al. (1994; siehe auch Fischlin und Gyalistras 1997) vorgeschlagenen statistischen Regionalisierungsmethode berechnet. Diese Methode basiert auf einer für jeden Standort und Monat separat durchgeführten CCA, wobei der grossräumige Zustand der Atmosphäre durch die monatlich gemittelten bodennahen Luftdruck- (SLP) und Temperaturfelder (T) über dem Nordatlantik und Europa beschrieben wird. Im Folgenden betrachten wir fünf verschiedene Szenarien, bei denen die abhängigen Variablen an jedem Standort durch das monatliche Temperaturmittel und die Quadratwurzel der monatlichen Niederschlagssumme gegeben waren. Berücksichtigt wurden 40 über die ganze Schweiz verteilte Standorte (32 auf der Alpennord- und 8 auf der Alpensüdseite).

Das erste Szenario basierte auf einer $2\times\text{CO}_2$ -Simulation mit dem ECHAM1+LSG-AOGCM (Cubasch et al. 1992, nicht in Tab. B2 aufgeführt). Das Referenzklima war durch 40 simulierte Jahre unter 1985-Bedingungen ($1\times\text{CO}_2$) und das geänderte Klima durch 20 simulierte Jahre unter $2\times\text{CO}_2$ -Bedingungen definiert (Szenario *ECH1/2xCO2+CCA(SLP&T)*; siehe auch Gyalistras et al. 1994, 1997 und 1998). Das zweite Szenario wurde für eine IPCC «Business-As-Usual»-Simulation mit dem gleichen Modell hergeleitet (Cubasch et al. 1992, Simulation Nr. 17 in Tab. B2), wobei die Veränderungen für 10 Jahre um 2080 relativ zum 40-jährigen Referenzklima betrachtet wurden (Szenario *ECH1/GHG/2080–1985+CCA(SLP&T)*; siehe auch Gyalistras et al. 1994 und 1998). Beim dritten Szenario handelte es sich um ein $2\times\text{CO}_2$ -Experiment mit dem CCC-GCMII (Boer et al. 1992, Simulation Nr. 5 in Tab. B2). Zur Regionalisierung wurden je fünf Jahre unter $1\times\text{CO}_2$ - und $2\times\text{CO}_2$ -Bedingungen betrachtet (Szenario *CCC2/2xCO2+CCA(SLP&T)*; siehe auch Fischlin und Gyalistras 1997, Gyalistras et al. 1997 und 1998). Die letzten zwei Szenarien schliesslich basierten auf den beiden bereits erwähnten Simulationen mit dem HadCM2-AOGCM (Mitchell und Johns 1997, Simulationen Nr. 32 und 33 in Tab. B2). In diesen Fällen wurden je 10 Jahre um das Jahr 2050 relativ zum simulierten Klima für die Jahre 1931–1980 betrachtet (Szenarien *HAD2/GHG/2050–1955/CCA(SLP&T)* und *HAD2/SUL/2050–1955/CCA(SLP&T)*).

Zwei wichtige Quellen von Unsicherheiten bei der statistischen Regionalisierung liegen in der Wahl der grossräumigen Prädiktoren sowie der statistischen Transferfunktion. Um die Sensitivität der schweizerischen Szenarien

auf diese zwei Faktoren zu untersuchen, wurden zwei zusätzliche Regionalisierungsstudien vorgenommen. In beiden Fällen stammten die Eingangsdaten aus der gleichen HadCM2-Simulation und Zeitperiode wie sie beim *HAD2/SUL/2050–1955/CCA(SLP&T)*-Szenario verwendet wurden. Zur Kalibrierung der statistischen Modelle standen jedoch grossräumige Messdaten nur aus den Jahren 1966–1994 zur Verfügung, so dass die durch das GCM simulierte Klimaveränderung ebenfalls relativ zum mittleren Klima für diese Referenzperiode (anstatt 1931–1980, siehe oben) berechnet wurde.

Bei der ersten der beiden Untersuchungen verwendeten wir wieder das oben beschriebene, CCA-basierte Verfahren von Gyalistras et al. (1994). Die grossräumigen Prädiktoren waren jedoch anstatt durch das Bodendruck- und Temperaturfeld lediglich durch das monatlich gemittelte 500 hPa Geopotentialfeld über dem genau gleichen Sektor gegeben. Auf der regionalen Seite wurden wieder die monatlichen Temperaturen und Niederschläge an den 40 Schweizer Standorten betrachtet (Szenario *HAD2/SUL/2050–1955/CCA(Z500)*).

Die zweite Untersuchung wurde von Neidhöfer (1999) durchgeführt und basierte auf einem gänzlich anderen Ansatz. Als Prädiktor diente ebenfalls das 500 hPa Geopotentialfeld über dem Nordatlantik und Europa, allerdings mit einer täglichen Auflösung. Auf der regionalen Seite wurden die täglichen Niederschlagssummen an 306 Schweizer Messstationen betrachtet. Die Regionalisierung beruhte auf der Suche von Analogfällen für den grossräumigen Zustand der Atmosphäre. Dabei wurden für jedes einzelne vom GCM simulierte, täglich gemittelte 500 hPa-Feld die zwanzig ähnlichsten Felder aus den Messdaten der Jahre 1966–1994 ermittelt. In einem zweiten Schritt wurden dann aus der Niederschlagsdatenbank für jeden gefundenen Fall und Standort die zugehörigen täglichen Niederschlagssummen herausgesucht. Der Tagesniederschlag an einem gegebenen Standort wurde schliesslich als das Mittel der jeweils gefundenen zwanzig Werte geschätzt. Neidhöfer (1999) berechnete tägliche Szenariendaten für die Perioden 2031–2060 und 2061–2090. In der vorliegenden Arbeit werden wir jedoch lediglich auf die annuell und saisonal gemittelten Niederschlagssummen für die Periode 2046–2055 und für 25 ausgewählte Klimastationen eingehen (Szenario *HAD2/SUL/2050–1955/ANALOG(Z500)*).

Ältere Szenarien

Beim Szenarienvergleich wurden vier ältere Szenarien mit einbezogen, die bereits in Gyalistras et al. (1998) besprochen wurden und deswegen hier nicht so ausführlich vorgestellt werden.

Die ersten zwei Szenarien waren ein $2\times\text{CO}_2$ -Gitterpunktszenario aus einer Simulation mit dem CCM0-GCM (Washington und Meehl 1984, Simulation Nr. 8 in Tab. B2) sowie ein zugehöriges regionalisiertes Szenario, das mittels Einbettung des MM4-RegCMs (Giorgi et al. 1992, horizontale Auflösung 70 km) in das CCM0-Modell erhalten wurde. Bei diesen zwei Szenarien standen uns für den Alpenraum die gebietsmittleren Veränderungen aus je fünf simulierten Jahren unter $1\times\text{CO}_2$ - und $2\times\text{CO}_2$ -Bedingungen für den Januar, April, Juli und Oktober zur Verfügung. Für den Szenarienvergleich gingen wir davon aus, dass die monatlichen Resultate näherungsweise für die jeweiligen Jahreszeiten repräsentativ sind. Die zwei Szenarien werden im Weiteren als CCM0/2xCO2 bzw. CCM0/2xCO2+MM4 bezeichnet.

Das dritte Szenario basierte auf einem Zeitscheibenexperiment mit dem ECHAM3(T106)-AGCM (Bengtsson et al. 1995, Bengtsson et al. 1996, Simulation Nr. 23 in Tab. B2), das mit Randbedingungen aus einem IPCC «Business-As-Usual»-Lauf mit dem ECHAM1+LSG-AOGCM berechnet wurde. Simuliert wurden je 5 Jahre um die Jahre 1980 ($1\times\text{CO}_2$) und 2045 ($2\times\text{CO}_2$). Hier lagen Informationen nur für den Januar und Juli vor, die wieder der jeweiligen Saison zugeordnet wurden (Szenario ECH1/GHG/2045–1980+ECH3(T106)).

Das vierte Szenario schliesslich wurde von Frey-Buness (1993; siehe auch Frey-Buness et al. 1995) erstellt und basierte auf dem bereits erwähnten Zeitscheibenexperiment mit dem ECHAM3(T42)-AGCM (Simulation Nr. 22 in Tab. B2). Dabei wurden die Resultate des ECHAM3-Laufs mittels des REWIH3D-Modells, das mit einer horizontalen Auflösung von zirka 25 km betrieben wurde, regionalisiert. Simuliert wurden je 10 Jahre mit Randbedingungen für die Jahre 1980 ($1\times\text{CO}_2$) und 2080 ($3\times\text{CO}_2$) (Szenario ECH1/GHG/2080–1980+ECH3(T42)+REWIH3D).

Statistische Signifikanz der Szenarien

Die möglichen Konsequenzen eines gegebenen Klimaszenarios für einen bestimmten Sektor, wie z. B. die Wasser- oder Landwirtschaft, dürften je nach der Geschwindigkeit, Form und Amplitude der berechneten Klimaveränderungen, aber auch je nach der betrachteten Region, Jahreszeit und Sektor stark variieren. Es ist jedoch generell davon auszugehen, dass die zu erwartenden Klimawirkungen um so bedeutender ausfallen dürften, je grösser die in einem Szenario berechneten Veränderungen im Vergleich zur beobachteten Klimavariabilität sind.

Als Vergleichsbasis für die Beurteilung der verschiedenen Szenarien werden in Tabelle 4.4 die aus Messungen in den letzten Jahrzehnten berechneten Mittelwerte (m) und Standardabweichungen (s) der regional und saisonal gemittelten Temperaturen und Niederschläge für den Alpenraum und die Schweiz zusammengefasst. Angegeben werden auch die Breiten (c_{90}) der geschätzten 90%-Konfidenzintervalle ($m \pm c_{90}$) für die Erwartungswerte μ der verschiedenen saisonalen Variablen in Abhängigkeit des Stichprobenumfangs n . Die c_{90} -Werte wurden unter der Annahme normalverteilter Variablen als $1.645 \times s / \sqrt{n}$ berechnet.

Zur objektiveren Beurteilung eines Szenarios ist es hilfreich, die statistische Signifikanz der berechneten Veränderungen zu ermitteln. Die statistische Signifikanz sagt allerdings an und für sich noch nichts über die tatsächliche Bedeutung der postulierten Veränderungen aus (z. B. im Hinblick auf die in einem bestimmten Sektor zu erwartenden Klimawirkungen). Sie gibt lediglich die Wahrscheinlichkeit an, dass das heutige und das Szenarioklima sich merklich voneinander unterscheiden.

Tabelle 4.4: Vergleich von Statistiken zu regional und saisonal gemittelten Temperaturen und Niederschlägen im Alpenraum und der Schweiz. Alpen: Statistiken beziehen sich auf den gesamten Alpenraum (Periode 1961–1990, basierend auf Daten aus Machenhauer et al. 1998); Schweiz: Statistiken beziehen sich auf das Mittel aus 40 schweizerischen Standorten (32 auf der Alpennord- und 8 auf der Alpensüdseite, Periode 1931–1980); m : Mittelwert; s : Standardabweichung; $c_{90}/n=N$: geschätzte Breite des 90%-Konfidenzintervalls für den Erwartungswert der jeweiligen Verteilung bei Stichprobenumfang N . Die Mittelwerte für die Temperaturen sind für Meereshöhe angegeben und wurden mithilfe eines jahreszeitlich variierenden Höhengradienten berechnet.

Region	Statistik	Temperatur (°C)				Niederschlag (m: mm/Tag, sonst %)			
		Winter	Frühling	Sommer	Herbst	Winter	Frühling	Sommer	Herbst
Alpen	m	3.8	12.0	20.5	13.1	3.1	3.7	4.2	3.6
	s	1.2	0.8	0.8	0.7	23	18	17	24
	$c_{90}/n=5$	0.9	0.6	0.6	0.5	17	13	13	18
	$c_{90}/n=10$	0.6	0.4	0.4	0.4	12	9	9	12
	$c_{90}/n=30$	0.4	0.2	0.2	0.2	7	5	5	7
	$c_{90}/n=50$	0.3	0.2	0.2	0.2	5	4	4	6
Schweiz	m	2.9	12.0	20.4	11.8	2.8	3.1	4.4	3.3
	s	1.3	1.0	0.8	0.8	35	22	19	30
	$c_{90}/n=5$	1.0	0.8	0.6	0.6	26	16	14	22
	$c_{90}/n=10$	0.7	0.5	0.4	0.4	18	11	10	16
	$c_{90}/n=30$	0.4	0.3	0.2	0.2	10	7	6	9
	$c_{90}/n=50$	0.3	0.2	0.2	0.2	8	5	4	7

Die statistische Signifikanz der Abweichung eines langjährigen Temperatur- oder Niederschlagsmittels vom Referenzklima hängt von mehreren Faktoren ab: erstens von der Grösse der Abweichung, zweitens von der Variabilität der betrachteten Grösse unter dem Referenz- und dem Szenarioklima, und drittens von den jeweils zur Verfügung stehenden Stichprobenumfängen. So kann bei kleinen Stichprobenumfängen selbst eine grosse Abweichung statistisch nicht signifikant sein, während mit zunehmender Stichprobengrösse die Wahrscheinlichkeit, dass eine kleine Abweichung lediglich auf eine Zufallsschwankung zurückzuführen ist, immer kleiner wird.

In Tabelle 4.5 werden die typischen minimalen Abweichungen $|\Delta_{\min}|$ zwischen den Mittelwerten m_1 und m_2 von zwei Stichproben mit den Umfängen n_1 und n_2 angegeben, ab denen ein statistisch signifikanter Unterschied für die Erwartungswerte μ_1 und μ_2 der regional und saisonal gemittelten Temperaturen oder Niederschläge im Alpenraum erwartet werden kann (Signifikanzniveau $1-\alpha = 90\%$; Nullhypothese: $\mu_1 = \mu_2$). Die in Tabelle 4.5 angegebenen $|\Delta_{\min}|$ wurden unter der Annahme berechnet, dass alle betrachteten Variablen normalverteilt sind. Verwendet wurde die Formel

$$|\Delta_{\min}| = t^{-1}[n_1 + n_2 - 2, \alpha] \sqrt{\frac{(n_1 + n_2)(n_1 n_2)((n_1 - 1)s_1^2 + (n_2 - 1)s_2^2)}{(n_1 + n_2 - 2)}}$$

wobei $t^{-1}[n, \alpha]$ denjenigen Wert x angibt, für den das Integral zwischen $-x$ und $+x$ über die «Student» t-Verteilungsfunktion mit n Freiheitsgraden $1-\alpha$ beträgt. Für s_1 und s_2 verwendeten wir den Mittelwert aller in Tabelle 4.4 gezeigten Standardabweichungen, d. h. für die Temperatur waren $s_1 = s_2 = 0.94$ °C und für den Niederschlag $s_1 = s_2 = 0.83$ mm/Tag (entsprechend 23.5% von $m = 3.5$ mm/Tag).

Eine weitere beim Szenarienvergleich sich stellende Frage ist, inwieweit sich die verschiedenen Szenarien untereinander unterscheiden. Diese Frage lässt sich im Prinzip auf gleiche Weise wie diejenige nach dem Unterschied zwischen dem heutigen und einem gegebenen Szenarioklima beantworten

Tabelle 4.5: Zusammenstellung typischer minimaler Abweichungen zwischen den Mittelwerten von zwei Stichproben, ab denen ein statistisch signifikanter ($1-\alpha = 90\%$) Unterschied für die regional und saisonal gemittelte Temperatur und den Niederschlag im Alpenraum vorliegt. n_1 : Umfang der ersten Stichprobe (z. B. heutiges Klima); n_2 : Umfang der zweiten Stichprobe (z. B. Szenarioklima). Für weitere Erklärungen siehe Text.

	Temperatur (°C)				Niederschlag (%)			
	$n_2 = 5$	$n_2 = 10$	$n_2 = 30$	$n_2 = 50$	$n_2 = 5$	$n_2 = 10$	$n_2 = 30$	$n_2 = 50$
$n_1 = 5$	1.1	0.9	0.8	0.7	28	23	19	18
$n_1 = 10$	0.9	0.7	0.6	0.5	23	18	14	14
$n_1 = 30$	0.8	0.6	0.4	0.4	19	14	10	9
$n_1 = 50$	0.7	0.5	0.4	0.3	18	14	9	8

(Tab. 4.5). Eine entsprechende, systematische Untersuchung hätte jedoch eine bessere Datenbasis vorausgesetzt, als uns für diese Studie zur Verfügung stand.

Hier begnügen wir uns deswegen mit dem Vergleich von einigen ausgewählten, statistisch regionalisierten Niederschlagsszenarien für den Schweizer Alpenraum. Bei diesem Vergleich interessierte uns weniger die genaue quantitative Ausprägung der Szenarien, sondern in erster Linie inwieweit die jeweils angegebenen Tendenzen (Abnahme, Zunahme oder keine Veränderung des Niederschlags) übereinstimmten. Für den paarweisen Vergleich der Szenarien gingen wir daher von der folgende Regel aus: Falls für eine gegebene Jahreszeit und geographische Region (Alpennord- oder Alpensüdseite) die berechneten Veränderungen in den zwei Szenarien zwischen $-\Delta N_{\min}$ (= -10%, vergleiche Tab. 4.5) und $+\Delta N_{\min}$ lagen, wurde dies als eine Übereinstimmung gedeutet. Ansonsten mussten, um eine Übereinstimmung zu erzielen, beide Veränderungen kleiner als $-\Delta N_{\min}$ oder grösser als $+\Delta N_{\min}$ sein.

Die signifikante Anzahl von Übereinstimmungen wurde wie folgt abgeschätzt: Würde man die zwei Szenarien zufällig und unabhängig voneinander ermitteln (z. B. durch Würfeln) und dabei annehmen, dass die drei Ereignisse « $\Delta N \leq -\Delta N_{\min}$ », « $-\Delta N_{\min} < \Delta N \leq +\Delta N_{\min}$ » und « $\Delta N > +\Delta N_{\min}$ » gleich wahrscheinlich sind, so würde die Wahrscheinlichkeit, dass zwei Szenarien zufällig übereinstimmen $p = 3(1/9) = 33\%$ betragen. Die Wahrscheinlichkeiten $P(k \geq K)$ für mindestens K Übereinstimmungen zwischen zwei Szenarien sind durch eine Binomialverteilung mit Parametern $n = 8$ (zwei Regionen mal vier Jahreszeiten) und $p = 1 - q = 33\%$ gegeben, so dass $P(k \geq 4) = 26\%$, $P(k \geq 5) = 9\%$, $P(k \geq 6) = 2\%$, $P(k \geq 7) = 0.3\%$ und $P(k = 8) = 0.02\%$. Wenn wir für die Bestimmung der drei oben erwähnten Ereignisse davon ausgingen, dass die ΔN einer Normalverteilung entstammen, deren Erwartungswert und Standardabweichung aus allen betrachteten Szenarienwerten berechnet wurde, ergaben sich $p = 0.49$, sowie $P(k \geq 4) = 61\%$, $P(k \geq 5) = 34\%$, $P(k \geq 6) = 13\%$, $P(k \geq 7) = 3.1\%$ und $P(k = 8) = 0.3\%$. Bei mindestens sechs bis sieben Treffern konnte somit die Hypothese, dass die beiden Szenarien nur zufällig gleiche Ereignisse aufweisen, mit einer Sicherheit von mehr als 90% verworfen werden.

4.4.3. Beschreibung der Szenarien

In diesem Abschnitt soll zuerst ein Überblick über die wichtigsten Resultate aus den oben beschriebenen Studien gegeben werden. Ein systematischer Vergleich der verschiedenen Szenarien sowie eine Diskussion der gefundenen Gemeinsamkeiten, Unterschiede und Probleme folgt dann in den Abschnitten 4.4.4. und 4.4.5.

Szenarien aus globalen Klimamodellen

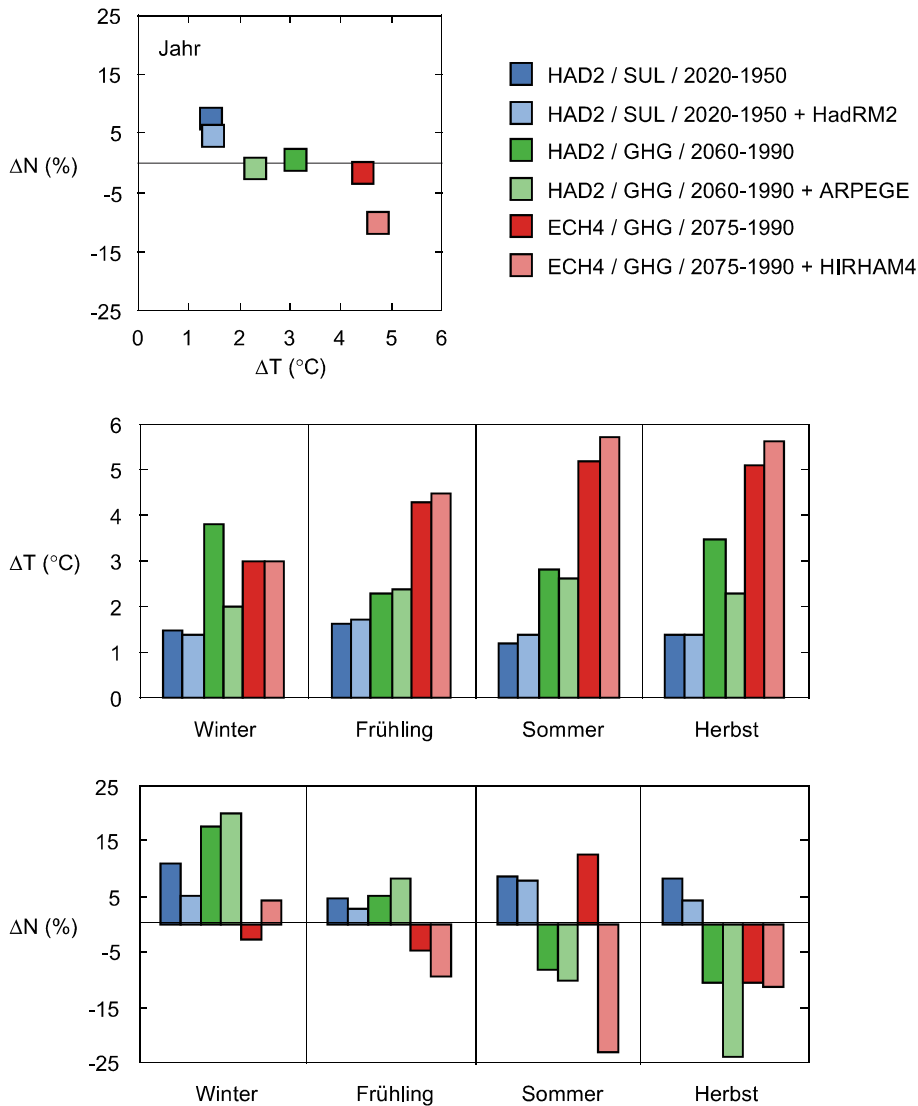
Die von den HadCM2- und ECHAM4+OPYC3-AOGCMs simulierten Veränderungen für die gebietsmittleren Temperaturen und Niederschläge über dem Alpenraum sind in Figur 4.6 zusammengefasst. Die Figur enthält aus Vergleichszwecken auch die Resultate der drei zugehörigen regionalen Klimasimulationen, die weiter unten besprochen werden.

Das *HAD2/SUL/2020–1950*-Szenario zeigte erwartungsgemäss immer die kleinste und das *ECH4/GHG/2075–1990*-Szenario (mit Ausnahme des Winters) immer die grösste Erwärmung. Für das Jahresmittel des Niederschlags (Fig. 4.6 oben) wurden positive (*HAD2/SUL*-Szenario) oder nur kleine (*HAD2/GHG*- und *ECH4/GHG*-Szenario) Veränderungen berechnet. Bei den saisonalen Niederschlägen (Fig. 4.6 unten) zeigten sich hingegen zum Teil gegensätzliche Veränderungen.

Beim *ECH1/GHG/2080–1980+ECH3(T42)*-Szenario wurde im Mittel über die 16 «alpinen» Gitterpunkte des Modells eine Niederschlagszunahme um 8% berechnet. Auf der Südseite der Modellalpen betrug die Zunahme zwischen 15% und 40% und auf der Nordostseite zwischen 3% und 11%. An den nordwestlichen Gitterpunkten zeigten sich Niederschlagsabnahmen von zirka 3% (Burkhardt (1999), berichtet über etwas andere Werte, die wir aber in unseren Berechnungen nicht nachvollziehen konnten).

Szenarien aus Simulationen mit hochauflösenden Klimamodellen

Die gebietsmittleren Temperatur- und Niederschlagsveränderungen für den Alpenraum aus den drei von Machenhauer et al. (1998) betrachteten Regionalisierungsstudien sind in Figur 4.6 zusammengefasst. Für die annuell gemittelten Veränderungen wurden ähnliche Werte ermittelt, wie sie direkt von den GCMs simuliert wurden (Fig. 4.6 oben). Grössere Abweichungen bei den



Figur 4.6: Vergleich der durch globale und regionale Klimamodelle simulierte Temperatur- und Niederschlagsveränderungen für den Alpenraum. Alle Angaben sind Gebietsmittel über dem gesamten Alpenbogen. Gezeigt sind Resultate für drei Paare von Simulationen mit jeweils einem globalen Klimamodell (starke Färbung) sowie einem nachgeschalteten Klimamodell mit einer grösseren horizontalen Auflösung (schwache Färbung). Die Simulationen basieren auf unterschiedlichen Ausgangsannahmen und beziehen sich auf unterschiedliche zukünftige Zeitpunkte (für weitere Erklärungen siehe Legende und Text). ΔT , ΔN : Abweichung des unter Szenariobedingungen simulierten langjährigen Temperatur- bzw. Niederschlagsmittels vom Mittel der jeweiligen Kontrollsimulation (heutiges Klima). Oben: jährlich gemittelte Abweichungen; Mitte: Abweichungen der saisonalen Temperaturmittel; Unten: Abweichungen der saisonalen Niederschlagssummen. Basierend auf Daten aus Machenhauer et al. (1998).

saisonalen Temperaturmitteln (Fig. 4.6 Mitte) zeigten sich beim *ARPEGE*-Szenario im Winter und im Herbst. Bei den saisonalen Niederschlägen (Fig. 4.6 unten) wichen insbesondere das *HIRHAM4*-Szenario im Sommer und das *ARPEGE*-Szenario im Herbst von den direkt durch die GCMs simulierten Veränderungen ab.

Die räumlichen Verteilungen der Niederschlagsveränderungen, die von den drei hochauflösenden Modellen für den Winter und den Sommer berechnet wurden, sind in Figur 4.7 dargestellt. Mit Ausnahme des *HadRM2*-Szenarios zeigten die simulierten Veränderungen eine grosse räumliche Variabilität über Europa. Dabei wurde in der Regel über dem Alpenraum, ausser vielleicht für das *ARPEGE*-Szenario im Winter, ein besonders starkes Signal ermittelt. Auffällig sind auch die simulierten Unterschiede zwischen der Alpennord- und Alpensüdseite im *HadRM2*-Szenario im Winter und im *HIRHAM4*-Szenario in beiden Jahreszeiten.

Machenhauer et al. (1998) analysierten für ganz Europa sowie getrennt nach verschiedenen europäischen Subregionen die regional und saisonal gemittelten Veränderungen des Niederschlags und der Temperatur aus den drei GCM-Szenarien und den zugehörigen hochauflösenden Simulationen. Das Niederschlagssignal für den Alpenraum war in sieben der total 6 Szenarien x 4 Jahreszeiten = 24 betrachteten Fälle statistisch signifikant ($\alpha = 95\%$). In 21 Fällen war es grösser als die jeweils simulierte mittlere Veränderung für ganz Europa. Die über dem Alpenraum simulierten Temperaturzunahmen (Fig. 4.6) waren immer statistisch signifikant. Hier wurden in allen ausser fünf Fällen grössere Veränderungen als im europäischen Mittel erhalten (siehe Tabellen 1.1 bis 2.4 in Machenhauer et al., 1998).

Das *ECH4/GHG/2085–1985+2xREWIH3D*-Szenario ergab im Mittel über das gesamte Alpengebiet eine Erwärmung der Sommertemperaturen um 3.9 °C. Die Temperaturerhöhung war über den westlichen Alpen und dem zentralen Gebirgskörper besonders gross (mehr als 4.5 °C) und nahm gegen den Norden hin ab. Für den Niederschlag ergaben sich für den östlichen Teil des Alpenbogens Zunahmen, sonst aber grosse Abnahmen, die im Westen wieder besonders gross (> 50%) ausfielen. Für Bayern nahm dabei die Häufigkeit der trockenen Tage von 40% bis 50% auf 60% bis 75% zu, während die Zahl der Starkniederschläge (>20 mm/Tag) in weiten Teilen Bayerns und der Nordostschweiz um mehr als 50% abnahm. Das Signal für die Starkniederschläge zeigte jedoch eine grosse räumliche Variabilität, so dass an einzelnen Modellgitterpunkten über der Schweiz sowie über grösseren zusammenhängenden Regionen, wie etwa über Nordschwaben und Teilen Unter- und Oberfrankens, Zunahmen um mehr als 100% erhalten wurden. Für die drei Modellgitterpunkte in der Nähe der drei schweizerischen Standorte Zürich, Payerne und Sion ergaben sich Temperaturerhöhungen um 4.2, 3.7

und 4.8 °C sowie Niederschlagsabnahmen um 36%, 43% und 29% (Heimann und Sept 1998, Heimann et al. 1998).

Die im *CSCO2/2xCO2+RegCM2*-Szenario erhaltenen mittleren Veränderungen für den Alpenraum sowie die bei der Modellierung des heutigen Klimas auftretenden systematischen Abweichungen von den Messdaten sind in Tabelle 4.6 dargestellt. Die systematischen Fehler waren meistens relativ klein im Vergleich zur natürlichen Klimavariabilität (vergleiche Tab. 4.4 und 4.5) und den Messungenauigkeiten bei der Abschätzung des heutigen Klimas. Grössere Modellfehler wurden nur für die Temperatur im Frühling und den Niederschlag im Sommer erhalten (Tab. 4.6). Im Jahresmittel ergab sich eine Temperaturerhöhung um 5.5 °C und eine Niederschlagszunahme um 19%. Die Erwärmung war recht gleichmässig über das Jahr verteilt, während der Niederschlag vor allem im Winter und Sommer zunahm. Ein weiteres, in Tabelle 4.6 nicht gezeigtes Resultat war, dass die simulierte Erwärmung für den Winter und Frühling signifikant mit der Höhe um zirka 0.6 °C/km bzw. 1 °C/km zunahm (Giorgi et al. 1997) .

Das *UKMO/2xCO2+HadRM2*-Szenario zeigte über dem Alpenraum im Winter eine Erwärmung um 4 bis 5 °C und eine allgemeine Niederschlagszunahme, besonders auf der Alpensüdseite. Für den Sommer wurde eine Erwärmung um 2 bis 3 °C und starke Niederschlagszunahmen (>20%) erhalten. Genaue quantitative Angaben zu dieser Simulation standen uns leider nicht zur Verfügung.

Tabelle 4.6: Mit dem *CSCO2/RegCM2*-Modellsystem erhaltene Resultate für den Alpenraum. Alle Angaben sind Gebietsmittel über dem gesamten Alpenbogen. T: langjähriges Temperaturmittel; N: langjähriges Niederschlagsmittel; Bias: mittlerer systematischer Fehler bei der Simulation des heutigen Klimas (1xCO₂). Δ: Unter der Annahme einer CO₂-Verdoppelung (2xCO₂) relativ zur Simulation des heutigen Klimas erhaltene Veränderung. Für weitere Erläuterungen siehe Text. Basierend auf Daten aus Giorgi et al. (1997).

	Jahr	Winter	Frühling	Sommer	Herbst
T Bias (°C)	-0.8	1.3	-4.1	1.0	-1.3
ΔT (°C)	5.5	5.2	5.4	5.7	5.7
N Bias (%)	-1	9	9	-24	0
ΔN (%)	19	41	4	43	-5

Figur 4.7: Von drei räumlich hochauflösenden Klimamodellen simulierte Veränderungen des langjährigen mittleren Niederschlags über Europa. Gezeigt sind die unter Szenarienbedingungen simulierten Abweichungen relativ zu den jeweiligen Kontrollsimulationen für den Winter (links) und den Sommer (rechts). Die Simulationen basieren auf unterschiedlichen Ausgangsannahmen und beziehen sich auf unterschiedliche zukünftige Zeitpunkte (für weitere Erklärungen siehe Überschriften und Text). Aus Machenhauer et al. (1998).

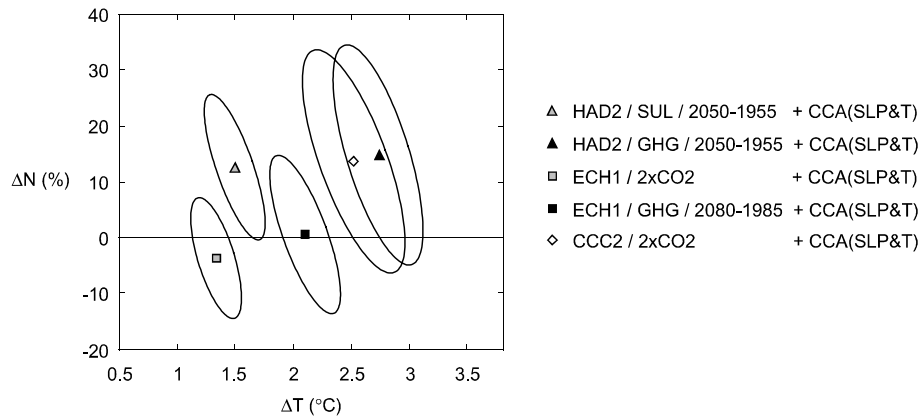
In der *SENS2K*-Studie wurde eine Erhöhung des gebietsmittleren Oktober-Niederschlags für die Alpen um 12% berechnet. Eine genauere Analyse der simulierten Niederschlagsereignisse zeigte, dass die Anzahl der Niederschlagstage praktisch unverändert blieb, die Häufigkeit der stärkeren Ereignisse aber mit zunehmender Intensität progressiv zunahm. So erhöhten sich die Frequenzen der Niederschlagsereignisse von mehr als 10, 20 und 30 mm/Tag um zirka 10%, 15% bzw. 25% (Frei et al. 1998).

Szenarien aus statistischen Regionalisierungsmethoden

Das *ECH1/GHG/2080–1980+ECH3(T42)+CCA(Z500)*-Szenario zeigten im Mittel über alle betrachteten Stationen im Alpenraum keine signifikante Veränderung des Winterniederschlags (+1%). An den west- und südalpinen Stationen wurden jedoch Niederschlagszunahmen zwischen 2% und 8%, an den nordwestlichen Stationen keine oder nur geringfügige Zunahmen und an den weiter nordöstlich liegenden Stationen Abnahmen um einige Prozent berechnet.

Figur 4.8 fasst die Resultate der fünf mittels der *CCA(SLP&T)*-Methode hergeleiteten Szenarien zusammen. Gezeigt sind die über die ganze Schweiz (40 Standorte) und annuell gemittelten Veränderungen der Temperatur und des Niederschlags. Die Symbole kennzeichnen die «besten Schätzungen» für die jeweiligen Veränderungen, während die Ellipsen die zugehörigen empirisch ermittelten 90%-Konfidenzintervalle angeben. Die Konfidenzintervalle wurden mittels einer Bootstrap-Prozedur (DiCiccio und Tibshirani 1987) berechnet und berücksichtigen die natürliche Variabilität bei der Definition des regionalen Referenzklimas, sowie die Unsicherheiten bei der Schätzung der Parameter des statistischen Regionalisierungsmodells aus den lokalen und grossräumigen Messdaten (verwendet wurden Daten aus der Periode 1931–1980, d. h. $n = 50$).

Die durch die GCMs simulierte Klimavariabilität wurde bei der Bestimmung der Konfidenzintervalle jedoch nicht mitberücksichtigt. Dies ermöglicht einen direkten Vergleich der Konfidenzintervalle, da der Effekt verschieden langer Perioden zur Definition des Referenz- und geänderten Klimas in den verschiedenen GCM-Simulationen sowie etwaige Fehler bei der Simulation der natürlichen Klimavariabilität in den GCMs unterdrückt wurden. Andererseits ist zu beachten, dass die Konfidenzintervalle somit nur eine untere Grenze für die effektiv vorliegende statistische Unsicherheit angeben. Diese ist umso grösser, je weniger Jahre zur Definition der grossräumigen Klimaveränderung im GCM zur Verfügung standen (vgl. Tab. 4.5).

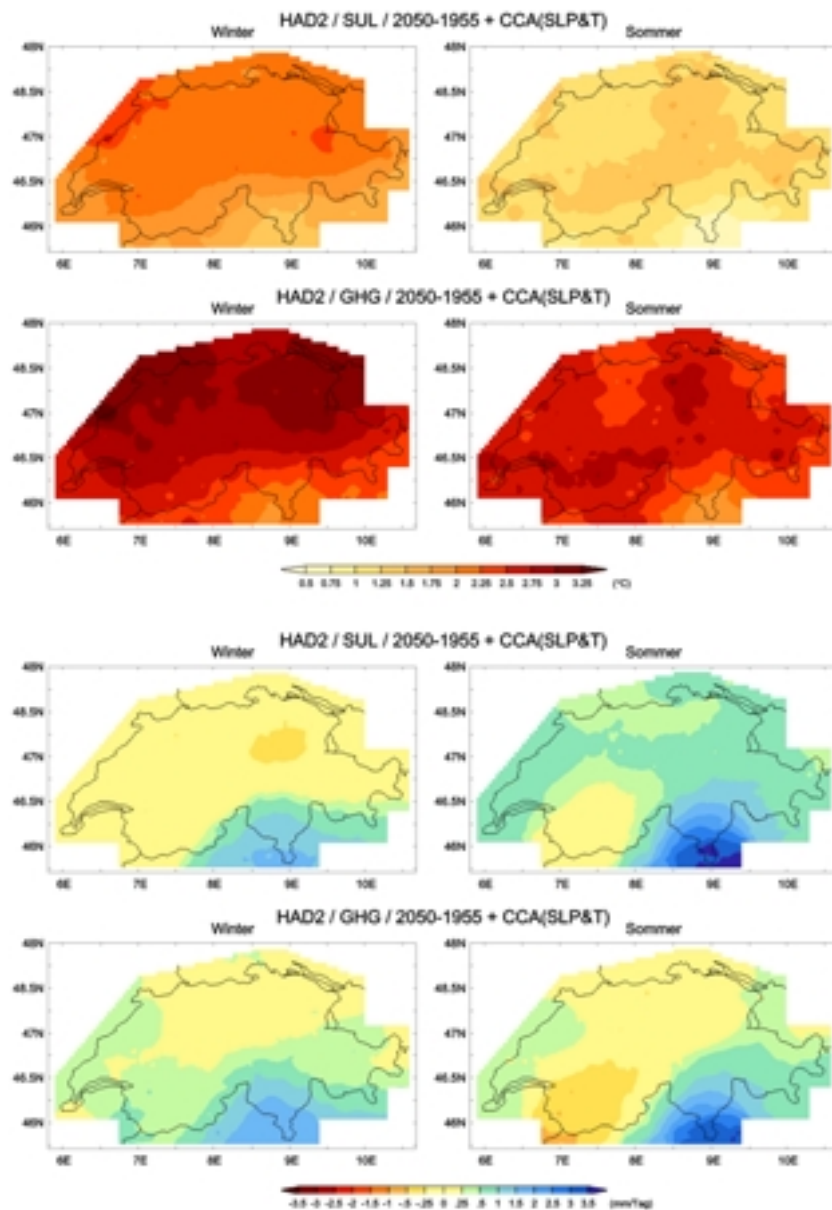


Figur 4.8: Vergleich von aus fünf verschiedenen globalen Klimasimulationen statistisch regionalisierten annuellen Klimaszenarien für die Schweiz. Gezeigt sind die mittleren Abweichungen des langjährigen annuellen Temperatur- (ΔT) und Niederschlagsmittels (ΔN) aus 40 schweizerischen Standorten relativ zum jeweils angenommenen Referenzklima. Die Szenarien basieren auf unterschiedlichen Ausgangsannahmen und beziehen sich auf unterschiedliche zukünftige Zeitpunkte (für weitere Erklärungen siehe Legende und Text).

Die «besten Schätzungen» für die fünf Szenarien ergaben Temperaturerhöhungen zwischen 1.3 °C und 2.8 °C (Fig. 4.8). Die zwei *HAD2*-Szenarien sowie das *CCC2*-Szenario zeigten eine generelle Tendenz zu mehr Niederschlag, während für die beiden *ECH1*-Szenarien keine Veränderung oder eine leichte Abnahme des Jahresniederschlags berechnet wurde. Die Breiten der Konfidenzintervalle für die Temperatur waren generell kleiner, für den Niederschlag jedoch ungefähr gleich gross (*HAD2/SUL*-Szenario) oder deutlich grösser (alle anderen Szenarien) als die jeweils durch die «besten Schätzungen» angegebenen Veränderungen.

Sowohl für die Temperatur als auch für den Niederschlag nahm die statistische Unsicherheit mit zunehmender Stärke der regionalisierten Veränderungen zu. Die gezeigten Konfidenzintervalle waren dabei generell grösser als die heutigen 90%-Konfidenzintervalle für die Erwartungswerte der regional und annuell gemittelten Temperatur und des Niederschlags, deren Breiten (bei $n = 50$) 0.13 °C bzw. 3.0% betragen (vgl. Tab. 4.5).

Figur 4.9 zeigt die aus den beiden *HAD2*-Szenarien erhaltenen Veränderungen der saisonal gemittelten schweizerischen Temperatur- und Niederschlagsfelder für den Winter und den Sommer. In allen Fällen ergaben sich deutliche Nord-Süd-Gradienten, wobei für die Alpensüdseite generell die kleineren Temperatur-, dafür aber die grösseren Niederschlagszunahmen berechnet wurden.



Figur 4.9: Beispiele räumlich hochaufgelöster Klimaszenarien für die Schweiz. Gezeigt sind mittlere Abweichungen der langjährigen mittleren Temperaturen (obere zwei Bildreihen) und Niederschläge (untere zwei Bildreihen) für den Winter (links) und den Sommer (rechts) für die Jahre 2046–2055 relativ zum Klima der Referenzperiode 1931–1980. Alle Szenarien wurden mittels eines statistischen Regionalisierungs- und eines räumlichen Interpolationsverfahrens basierend auf zwei globalen Klimaänderungssimulationen mit dem HadCM2-GCM abgeschätzt. In der ersten Simulation (erste und dritte Bildreihe) wurde von einem kombinierten Treibhausgas- und direktem Sulfataerosol-Forcing, in der zweiten (zweite und vierte Bildreihe) nur von einem reinen Treibhausgas-Forcing ausgegangen. Für weitere Erklärungen siehe Text.

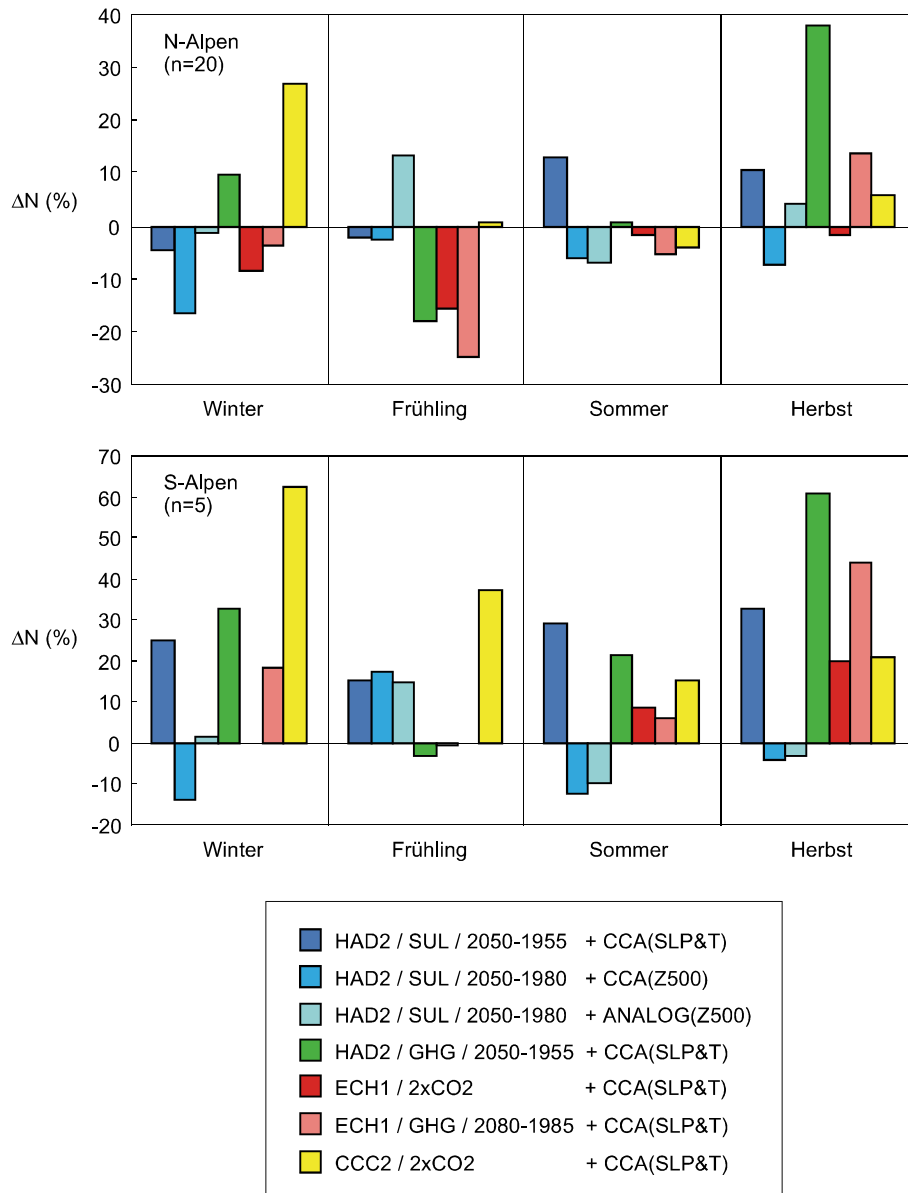
Die Temperaturanomalien zeigten bei beiden *HAD2*-Szenarien ähnliche Muster, die allerdings beim *HAD2/GHG*-Szenario stärker ausgeprägt waren. In beiden Szenarien wurde für den Winter eine stärkere Erwärmung als für den Sommer erhalten. Im Mittel über das gesamte Gebiet verringerte sich der Temperaturunterschied zwischen den beiden Jahreszeiten im Vergleich zum Referenzklima im *HAD2/SUL*-Szenario um zirka 1.3 °C und im *HAD2/GHG*-Szenario um 0.8 °C.

Die räumlichen Veränderungsmuster für den Niederschlag zeigten einige grössere Unterschiede. So wurde für den Winter im *HAD2/GHG*-Szenario für das Tessin und grössere Gebiete der Zentral- und Westschweiz Niederschlagszunahmen erhalten, während im *HAD2/SUL*-Szenario die Zunahme der Niederschläge klar auf die Alpensüdseite beschränkt blieb. Für den Sommer zeigte das *HAD2/SUL*-Szenario anders als das *HAD2/GHG*-Szenario grossflächige Niederschlagszunahmen nicht nur im Tessin, sondern auch auf der Alpennordseite. Zudem wurden im *HAD2/SUL*-Szenario keine grösseren Abnahmen im Südwesten der Schweiz erhalten.

Um die Unsicherheiten bei der Abschätzung von Szenarien für den Niederschlag zu verdeutlichen, werden in Figur 4.10 die aus sieben statistischen Regionalisierungsstudien erhaltenen mittleren saisonalen Niederschlagsveränderungen für 20 Standorte auf der Alpennord- und fünf auf der Alpensüdseite miteinander verglichen. Man beachte, dass in Figur 4.10 aus technischen Gründen im Gegensatz zu Figur 4.9 sowie den weiter unten gezeigten Figuren 4.11 und 4.12 sowie der Tabelle 4.7 Mittelwerte aus 25, nicht 40 Standorten gezeigt werden. Die Verwendung einer kleineren Anzahl von Standorten ergab quantitativ etwas andere Resultate, änderte jedoch nichts am Gesamtbild.

Für die Alpennordseite und den Winter ergaben die sieben Szenarien ein recht uneinheitliches Bild. Für den Frühling und den Sommer zeigten sich eher Niederschlagsab- und für den Herbst eher Niederschlagszunahmen. Die erhaltenen Veränderungen für die total $7 \times 4 = 28$ betrachteten saisonalen Fälle waren für die Alpennordseite wie folgt verteilt: 4 Fälle < -10%, 9 Fälle < -5%, 11 Fälle zwischen -5% und +5%, 8 Fälle > 5% und 6 Fälle > 10%. Für die Alpensüdseite wurde in 20 der 28 Fälle eine Niederschlagszunahme erhalten. Die Veränderungen folgten der folgenden Verteilung: 3 Fälle < -10%, 3 Fälle < -5%, 7 Fälle zwischen -5% und +5%, 18 Fälle > 5% und 16 Fälle > 10%.

Der Vergleich der drei *HAD2/SUL*-Szenarien, die sich vor allem in der Wahl der Regionalisierungsprozedur unterschieden, ergab das folgende Resultat: Die beiden CCA-basierten Szenarien stimmten gemäss dem in Kapitel 4.4.2. (Abschnitt «Statistische Signifikanz») beschriebenen Verfahren in nur zwei



Figur 4.10: Vergleich von aus verschiedenen globalen Klimasimulationen statistisch regionalisierten Niederschlagsszenarien für den Schweizer Alpenraum. Gezeigt sind die mittleren Abweichungen der langjährigen saisonalen Niederschlagsmittel relativ zum jeweils angenommenen Referenzklima. Die Szenarien basieren auf unterschiedlichen Ausgangsannahmen und beziehen sich auf unterschiedliche zukünftige Zeitpunkte (für weitere Erklärungen siehe Legende und Text). Oben: Mittlere Abweichungen aus 20 Nord- und Zentralalpinen Standorten. Unten: Mittlere Abweichungen aus fünf Standorten auf der Alpensüdseite.

Fällen (Frühling auf der Alpennord- wie auch auf der Alpensüdseite) überein, während die beiden aus dem 500 hPa Geopotentialfeld (Z500) regionalisierten Szenarien immerhin in vier Fällen (Sommer und Herbst auf der Alpennord-, sowie Frühling und Herbst auf der Alpensüdseite) ähnliche Resultate ergaben. Das gleiche Vorzeichen wurde in allen drei Szenarien gleichzeitig nur in zwei Fällen, für den Winter auf der Alpennord- und den Frühling auf der Alpensüdseite, erhalten (Fig. 4.10).

Die berechneten Veränderungen für die CCA-basierten *HAD2/SUL*- und *HAD2/GHG*-Szenarien, die sich vor allem im angenommenen Forcing unterschieden, stimmten in fünf Fällen überein (Winter und Herbst auf der Alpennord- und Winter, Sommer und Herbst auf der Alpensüdseite). Der Vergleich des *HAD2/GHG*-Szenarios mit den drei restlichen Szenarien bei denen ein reines Treibhausgas-Forcing angenommen wurde, ergab für das *ECH1/2xCO2*-Szenario in fünf Fällen (alle Fälle ausser dem Herbst auf der Alpennord- und dem Winter und Sommer auf der Alpensüdseite), für das *ECH1/GHG*- in sieben Fällen (einzige Ausnahme: Sommer auf der Alpensüdseite) und für das *CCC2*-Szenario in vier Fällen (Sommer auf der Alpennord- und Winter, Sommer und Herbst auf der Alpensüdseite) eine Übereinstimmung.

4.4.4. Übersicht und Vergleich der bestehenden Szenarien

In diesem Abschnitt sollen die weiter oben vorgestellten sowie einige ältere (siehe Kapitel 4.4.2.) Szenarien miteinander verglichen werden. Aufgrund der Limitierungen und der Heterogenität der uns zur Verfügung stehenden Datenbasis beschränkten wir den Vergleich auf die langjährigen regional (gesamter Alpenraum oder nur Schweiz), sowie annuell und saisonal gemittelten Temperaturen und Niederschläge.

Nicht in den Vergleich einbezogen wurden das *UKMO/2xCO2+HadRM2*-Szenario (Jones et al. 1997) sowie insgesamt drei weitere uns bekannte Szenarien, die von Rotach et al. (1997, siehe auch Gyalistras et al. 1998) und Martin et al. (1997) berechnet wurden. Die Gründe, dass diese Szenarien unberücksichtigt blieben, waren, dass sie den Alpenraum nur teilweise abdeckten oder dass uns keine genaueren quantitativen Angaben zur Verfügung standen. Hingegen wurde die Sensitivitätsanalyse von Frei et al. (1998, *SENS2K*) berücksichtigt, obwohl sie kein Szenario im strikten Sinne darstellt. In diesem Fall wurden die für den Oktober erhaltenen Resultate der Einfachheit halber dem Herbst zugeordnet.

Insgesamt standen uns nebst der erwähnten Sensitivitätsanalyse 21 Szenarien zur Verfügung, die alle in Tabelle 4.7 zusammengefasst werden. Die 21 Szenarien wurden aus acht globalen Simulationen mit sechs verschiedenen GCMs erstellt. Das am häufigsten benutzte globale Modell war das HadCM2-AOGCM (insgesamt acht regionale Szenarien), gefolgt vom ECHAM1+LSG- (sechs Szenarien) und dem ECHAM4+OPYC3-AOGCM (drei Szenarien).

Fünf Szenarien widerspiegeln $2\times\text{CO}_2$ -Gleichgewichtsbedingungen und 11 weitere Szenarien wurden aus insgesamt drei zeitabhängigen AOGCM-Simulationen unter einem reinen Treibhausgasforcing erstellt. Nochmals fünf weitere Szenarien gingen schliesslich von der zeitabhängigen *HAD2/SUL*-Simulation aus, bei der nebst dem Treibhausgas- auch das direkte Sulfataerosol-Forcing berücksichtigt wurde.

Figuren 4.11 und 4.12 zeigen graphische Darstellungen der in Tabelle 4.7 enthaltenen Daten. Da die Szenarien unterschiedliche Forcings und Ausgangsannahmen widerspiegeln, wählten wir dabei als ordnendes Merkmal die Veränderung der global und annuell gemittelten bodennahen Lufttemperatur (ΔT_g) aus den zugrundegelegten globalen Simulationen. ΔT_g schwankte in den verschiedenen Szenarien zwischen $0.8\text{ }^\circ\text{C}$ (Szenarien Nr. 4 und 13 in Tab. 4.7) und $4.6\text{ }^\circ\text{C}$ (Szenario Nr. 9) mit einem Mittelwert von $2.2\text{ }^\circ\text{C}$.

In Figur 4.11 sind die regionalisierten, annuell und saisonal gemittelten Temperaturveränderungen gegenüber ΔT_g aufgetragen. Nicht in dieser Figur berücksichtigt wurden die Resultate aus Szenario Nr. 21. Der Grund war, dass die in diesem Szenario erhaltenen, relativ kleinen oder sogar negativen Temperaturanomalien in ganz offensichtlichem Widerspruch zur ganzjährig simulierten grossräumigen Erwärmung im antreibenden GCM standen.

Die regionalisierten Temperaturanomalien hingen allgemein stark von ΔT_g ab. Dabei zeigten die für den gesamten Alpenraum berechneten Szenarien generell eine stärkere Erwärmung als die Schweizer Szenarien. Für die annuell gemittelte Temperatur betrug die Steigung der durch den Nullpunkt gehenden Regressionsgeraden für den gesamten Alpenraum $1.26\text{ }^\circ\text{C}/^\circ\text{C}$, für die Schweiz hingegen nur $0.85\text{ }^\circ\text{C}/^\circ\text{C}$. Ähnliche Unterschiede wurden auch für alle vier Jahreszeiten erhalten, wobei die berechneten Temperatursensitivitäten für den gesamten Alpenraum vom Winter zum Herbst von $1.15\text{ }^\circ\text{C}/^\circ\text{C}$ nach $1.45\text{ }^\circ\text{C}/^\circ\text{C}$ zunahmen, diejenigen des schweizerischen Gebiets hingegen von $0.93\text{ }^\circ\text{C}/^\circ\text{C}$ nach $0.76\text{ }^\circ\text{C}/^\circ\text{C}$ abnahmen.

Figur 4.12 zeigt die in den verschiedenen Szenarien berechneten Niederschlagsanomalien in Funktion von ΔT_g . Im Gegensatz zur Temperatur waren

Tabelle 4.7: Zusammenstellung von aus globalen Klimasimulationen berechneten Klimaszenarien für den Alpenraum und die Schweiz. Angegeben sind gebietsmittlere Veränderungen der langjährig mittleren Temperaturen (ΔT) und Niederschläge (ΔN). Reg.: Betrachtete Region (A = gesamter Alpenraum, S = Schweiz); ΔT_g : Veränderung der global und annuell gemittelten bodennahen Lufttemperatur im jeweils zugrundegelegten globalen Klimaszenario; J: Jahr; W: Winter (Dezember-Februar); F: Frühling (März-Mai); S: Sommer (Juni-August); H: Herbst (September-November); •: Keine Angabe vorhanden. Die Bezeichnungen der Szenarien richten sich nach der folgenden Konvention: Name des globalen Klimamodells / Typ des Simulations-experiments / zentrales Jahr des betrachteten zukünftigen Zeitfensters – zentrales Jahr der Referenzperiode + Regionalisierungsmethode(n). Die Angaben zu den Zeitfenstern sind nur bei Simulationsexperimenten mit einem zeitabhängigen Forcing vorhanden. Bei SENS2K handelt es sich um kein eigentliches Szenario, sondern um eine Sensitivitätsstudie mit einem regionalen Klimamodell. Für weitere Erläuterungen siehe Text.

Nr. Bezeichnung	Reg.	ΔT (°C)	ΔT (°C)					ΔN (%)				
			J	W	F	S	H	J	W	F	S	H
Szenarien aus GCM-Simulationen												
1 CCM0/2xCO2	A	3.5	3.3	3.5	3.0	2.6	4.2	19	20	20	21	13
2 ECH4/GHG/2075–1990	A	2.5	4.4	3.0	4.3	5.2	5.1	-2	-3	-5	12	-11
3 HAD2/GHG/2060–1990	A	2.0	3.1	3.8	2.3	2.8	3.5	1	17	5	-8	-11
4 HAD2/SUL/2020–1950	A	0.8	1.4	1.5	1.6	1.2	1.4	8	11	4	9	8
Szenarien aus Zeitscheibenexperimenten												
5 ECH1/GHG/2080–1980+ECH3(T42)	A	2.0	•	•	•	•	•	•	8	•	•	•
6 ECH1/GHG/2045–1980+ECH3(T106)	A	1.4	•	1.8	•	5.5	•	•	30	•	-40	•
7 HAD2/GHG/2060–1990+ARPEGE	A	2.0	2.3	2.0	2.4	2.6	2.3	-1	20	8	-10	-24
Szenarien aus RegCM-Simulationen												
8 CCM0/2xCO2+MM4	A	3.5	3.5	3.7	3.2	2.4	4.7	3	1	6	16	-12
9 CSCO2/2xCO2+RegCM2	A	4.6	5.5	5.2	5.4	5.7	5.7	19	41	4	43	-5
10 ECH1/GHG/2080–1980+ECH3(T42)+REWIH3D	A	2.0	•	2.2	•	2.3	•	•	48	•	14	•
11 ECH4/GHG/2075–1990+HIRHAM4	A	2.5	4.7	3.0	4.5	5.7	5.6	-10	4	-10	-23	-12
12 ECH4/GHG/2085–1985+2xREWIH3D	A	3.0	•	•	•	3.9	•	•	•	•	-21	•
13 HAD2/SUL/2020–1950+HadRM2	A	0.8	1.5	1.4	1.7	1.4	1.4	5	5	3	8	4
14 SENS2K	A	2.0	•	•	•	•	•	•	•	•	•	12
Szenarien aus statistischen Regionalisierungsmethoden												
15 CCC2/2xCO2+CCA(SLP&T)	S	3.5	2.5	2.9	2.5	2.5	2.2	12	37	11	-2	10
16 ECH1/2xCO2+CCA(SLP&T)	S	1.7	1.3	1.0	1.5	1.4	1.3	-3	-6	-12	0	4
17 ECH1/GHG/2080–1985+CCA(SLP&T)	S	2.5	2.1	2.1	2.3	2.2	1.8	0	2	-19	-4	22
18 ECH1/GHG/2080–1980+ECH3(T42)+CCA(Z500)	A	2.0	•	•	•	•	•	•	1	•	•	•
19 HAD2/GHG/2050–1955+CCA(SLP&T)	S	2.4	2.8	3.0	2.9	2.6	2.5	13	16	-15	4	46
20 HAD2/SUL/2050–1955+CCA(SLP&T)	S	1.6	1.5	2.2	1.1	1.3	1.5	11	3	3	16	17
21 HAD2/SUL/2050–1980+CCA(Z500)	S	1.5	(0.3)	(0.8)	(-0.2)	(0.4)	(0.3)	-7	-16	0	-7	-7
22 HAD2/SUL/2050–1980+ANALOG(Z500)	S	1.5	•	•	•	•	•	1	-1	14	-7	3

hier keine klaren Abhängigkeiten vom globalen Temperaturanstieg festzustellen. Für das Jahresmittel des Niederschlags betragen die Veränderungen zwischen -10% und +19%, mit einem Mittel von +4%. Für den Winter sowie die Schweizer Szenarien im Herbst wurden meistens Niederschlagszunahmen erhalten. Diese betragen im Mittel über alle 20 winterlichen Szenarien 12%, und über die sieben Schweizer Szenarien 14%. Für alle anderen Jahreszeiten zeigten die Szenarien keine klaren Tendenzen. Wenn die jeweils zwei (= zirka 10% von 22) extremsten Szenarienwerte in jeder Jahreszeit ausgeschlossen wurden, ergaben sich die folgenden Spannbreiten von Veränderungen: für den Winter zwischen -6% und +41%, für den Frühling zwischen -15% und +14%, für den Sommer zwischen -23% und +21% und für den Herbst zwischen -12% und +22%.

4.4.5. Diskussion

Die verfügbaren Szenarien widerspiegeln ein breites Spektrum an Ausgangsannahmen (Tab. 4.7) und zeigen je nach dem betrachteten Klimaparameter, der Region oder Jahreszeit einige gemeinsame Merkmale (z. B. Fig. 4.9 und 4.10), aber auch viele Unterschiede (z. B. Fig. 4.10 und 4.12). Somit stellen sich mehrere Fragen: Welche Klimaveränderungen sind nun für den Alpenraum in den nächsten Jahrzehnten am ehesten zu erwarten? Wie konsistent ist jedes einzelne Szenario? Inwieweit ist den gefundenen Gemeinsamkeiten zu trauen? Und was sind die Gründe für die gefundenen Unterschiede?

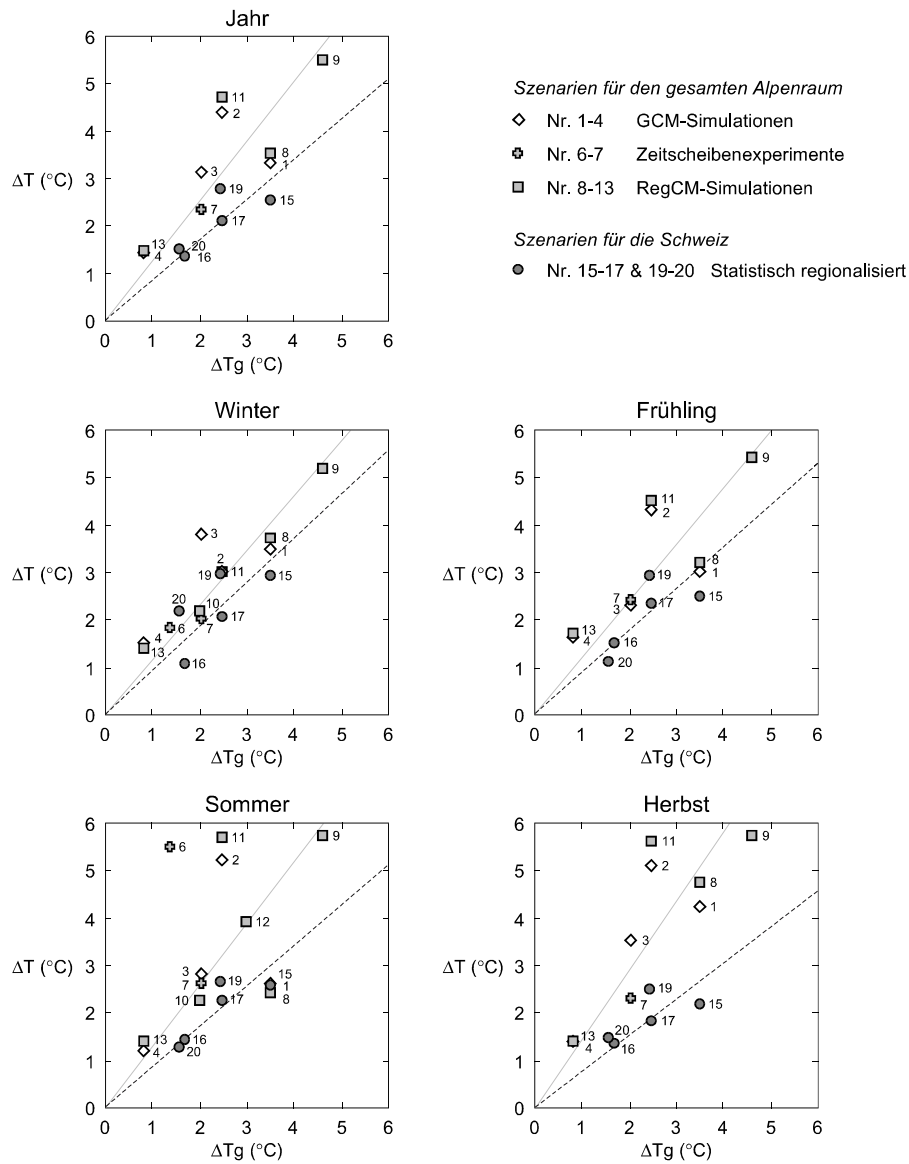
Aufgrund des umfangreichen Materials und nicht zuletzt auch wegen einer Reihe von methodischen und konzeptionellen Problemen, zum Beispiel im Zusammenhang mit der Beurteilung der verwendeten Simulations- und statistischen Modelle, muss eine umfassendere Beantwortung dieser Fragen späteren Studien vorenthalten bleiben. Hier begnügen wir uns mit der Diskussion einiger ausgewählter Aspekte, die für das Verständnis der gezeigten Resultate sowie bei der Formulierung von Arbeitshypothesen für die zukünftige Forschung hilfreich sein dürften. Ausführlichere Diskussionen der einzelnen Szenarien sind ausserdem in den jeweiligen Publikationen zu finden.

Wahl des globalen Forcings

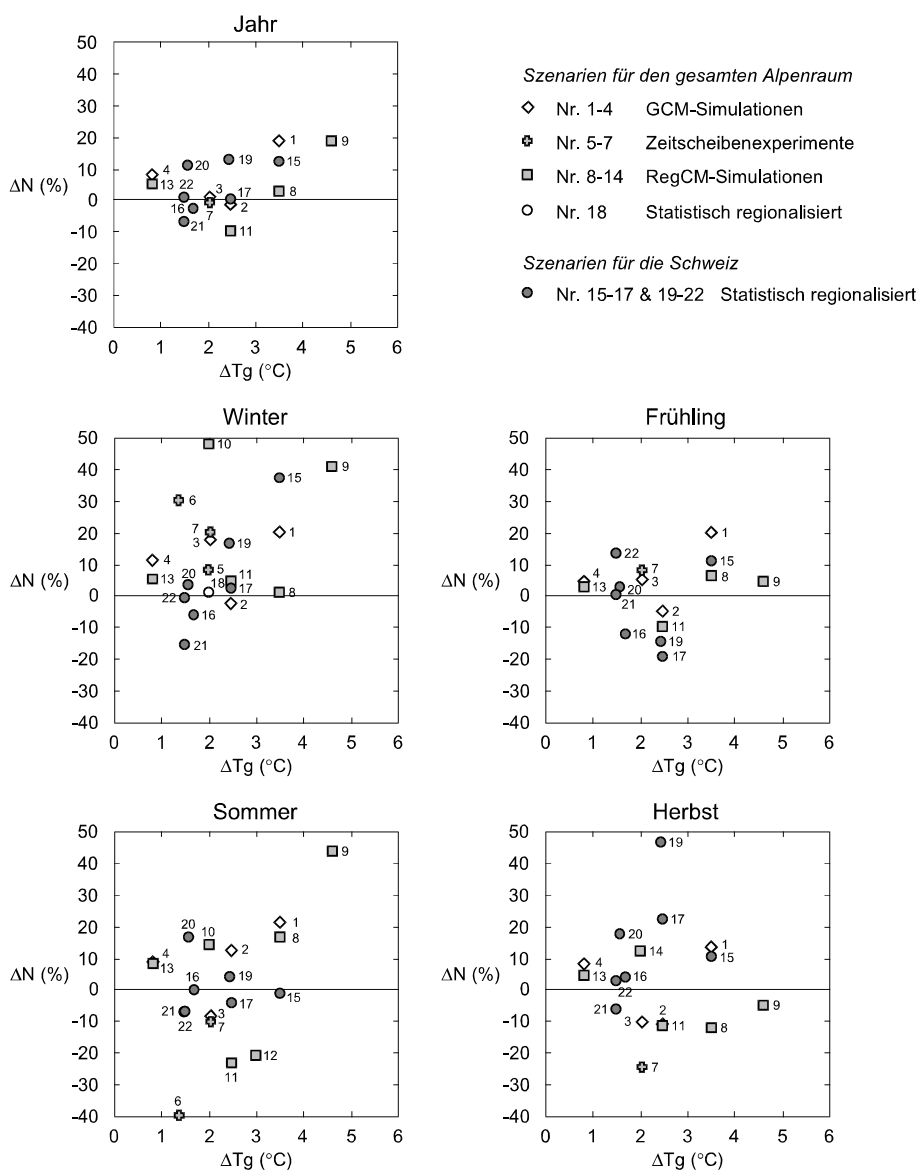
Alle vorgestellten Szenarien basierten auf spezifischen Annahmen zum zukünftigen Treibhausgas-Forcing des globalen Klimasystems. Inwieweit diese Annahmen auch wirklich eintreffen werden, kann nicht objektiv beurteilt werden (z. B. Grübler 1999). Zudem blieb das direkte Forcing durch Sulfataerosole in etlichen Szenarien unberücksichtigt. Der indirekte Effekt der Sulfataerosole, sowie mögliche zukünftige Schwankungen der Sonnenaktivität und Vulkanismus wurden in keinem einzigen Szenario mit einbezogen. Die letztgenannten zwei Forcings sind zwar im Vergleich zu den anthropogenen Forcings von zweitrangiger Bedeutung (Shine und Forster 1999), tragen jedoch dazu bei, dass allein schon aufgrund der Vielfalt der denkbaren Forcing-Szenarien eine präzise Prognose des zukünftigen Klimas prinzipiell unmöglich ist.

Wie stark hängen aber die für die Zukunft zu erwartenden *Tendenzen* von der exakten Wahl des Forcings ab? In den globalen Modellrechnungen ergibt die Berücksichtigung des kühlenden Sulfataerosol-Forcings im Vergleich zum Nur-Treibhausgas-Forcing auf der globalen Skala insgesamt sehr ähnliche, aber schwächere Veränderungsmuster. Auf der kontinentalen und regionalen Skala ergeben sich jedoch oftmals grössere Unterschiede (z. B. Cox et al. 1995, Meehl et al. 1996, Mitchell und Johns 1997, Ramaswamy und Chen 1997, Le Treut et al. 1998, Boer et al. 2000, Roeckner et al. 1999). Bei unserer Untersuchung standen uns lediglich zwei vergleichbare globale Simulationen mit und ohne Sulfataerosol-Forcing zur Verfügung, die beide mit dem HadCM2-AOGCM durchgeführt wurden. Die Anwendung der immer gleichen statistischen Regionalisierungsmethode (*CCA[SLP&T]*) auf die Resultate der beiden HadCM2-Simulationen ergab einige wichtige Unterschiede:

Erstens hatte das Sulfataerosol-Forcing erwartungsgemäss einen statistisch signifikanten Effekt auf die berechneten Szenarien für die Temperatur (Fig. 4.8). Für die Niederschlagsveränderungen zeigte sich hingegen keine klare Korrelation mit der Stärke der globalen oder regionalen Erwärmung (Fig. 4.8 und 4.10). Zweitens hatte das Sulfataerosol-Forcing signifikante Auswirkungen auf die jahreszeitlichen Verteilungen der berechneten Temperatur- (Fig. 4.9, sowie Szenarien Nr. 19 und 20 in Fig. 4.11) und Niederschlagsanomalien (insbesondere für den Frühling, Fig. 4.10). Drittens waren die unter verschiedenen Nur-Treibhausgas-Forcings berechneten saisonalen Niederschlagsszenarien im Schnitt einander ähnlicher als die Sulfataerosol- und Nur-Treibhausgas-Szenarien (Fig. 4.10). Schliesslich ergab die Berücksichtigung des Sulfataerosol-Forcings zum Teil unterschiedliche räumliche Muster der Klimaveränderung, insbesondere für den Niederschlag und für den Sommer (Fig. 4.9 und 4.10).



Figur 4.11: Vergleich von Temperaturszenarien für den Alpenraum (Szenarien Nr. 1–13) und die Schweiz (Szenarien Nr. 15–17 und 19–20). Alle Angaben sind Gebietsmittel über dem entsprechenden Gebiet. Die Szenarien basieren auf unterschiedlichen Ausgangsannahmen und beziehen sich auf unterschiedliche zukünftige Zeitpunkte (für weitere Erklärungen siehe Tab. 4.7 und Text). ΔT : Abweichung des unter Szenariobedingungen simulierten langjährigen Temperaturmittels vom Mittel der jeweiligen Kontrollsimulation (heutiges Klima). ΔT_g : Veränderung der global und annuell gemittelten bodennahen Lufttemperatur im jeweils zugrundegelegten globalen Klimaszenario. Gezeigt sind auch die durch den Ursprung gehenden Regressionsgeraden für den gesamten Alpenbogen (durchgezogen) und die Schweiz (gestrichelt) in Abhängigkeit von ΔT_g .



Figur 4.12: Vergleich von Niederschlagsszenarien für den Alpenraum (Szenarien Nr. 1–14 und 18) und die Schweiz (Szenarien 15–17 und 19–22). Alle Angaben sind Gebietsmittel über dem entsprechenden Gebiet. Die Szenarien basieren auf unterschiedlichen Ausgangsannahmen und beziehen sich auf unterschiedliche zukünftige Zeitpunkte (für weitere Erklärungen siehe Tab. 4.7 und Text). ΔN : Abweichung des unter Szenariobedingungen simulierten langjährigen Niederschlagsmittels vom Mittel der jeweiligen Kontrollsimulation (heutiges Klima). ΔT_g : Veränderung der global und annuell gemittelten bodennahen Lufttemperatur im jeweils zugrundegelegten globalen Klimaszenario.

Auch wenn aus der Betrachtung eines einzigen globalen Modells keine endgültigen Schlüsse gezogen werden können, zeigen unsere Resultate deutlich, dass die Berücksichtigung des Sulfataerosol-Forcings im Vergleich zum Nur-Treibhausgas-Forcing auch für den Alpenraum signifikant unterschiedliche Szenarien zur Folge haben kann. Insbesondere können viele Aspekte der Sulfataerosol-Szenarien nicht einfach aus den Nur-Treibhausgas-Szenarien und der Stärke des globalen Forcings allein vorausgesagt werden.

Fehlerquellen und Unsicherheiten bei der Regionalisierung

Selbst wenn davon ausgegangen würde, dass ein bestimmtes Forcing als besonders wahrscheinlich anzusehen ist, müssen die daraus berechneten Szenarien mit Vorsicht beurteilt werden.

Eine erste grössere Fehlerquelle liegt bei der Modellierung des globalen Klimasystems. So werden in den heutigen globalen Klimamodellen viele wichtige Faktoren, wie beispielsweise die Reaktion der Biosphäre oder mögliche zukünftige Veränderungen in der Landnutzung (z. B. Pielke et al. 1998), nur unzureichend oder gar nicht berücksichtigt. Ein weiteres Problem ist die stark vereinfachte Darstellung der alpinen Topographie. Schliesslich gibt es eine Reihe von sehr rasch ablaufenden oder kleinräumigen Prozessen (z. B. Wolkenbildung oder Interaktionen zwischen der Atmosphäre und der Landoberfläche), die für das regionale Klima von Bedeutung sind, aber in den Modellen wegen Beschränkungen in den verfügbaren Kenntnissen, Daten oder Rechenkapazitäten nur sehr grob dargestellt werden. Die möglicherweise daraus resultierenden Fehler können dazu führen, dass der gemessene statistische Zusammenhang zwischen dem grossräumigen und dem regionalen Klima nicht korrekt reproduziert wird (Burkhardt 1995, siehe aber auch Busuioc et al. 1999). In diesem Fall können grössere Unterschiede zwischen den an einzelnen GCM-Gitterpunkten simulierten und den aus einer Regionalisierungsprozedur berechneten Veränderungen auftreten.

Die in unserer Studie verwendeten GCMs zeigten in den Simulationen des heutigen Klimas oftmals systematische Fehler, die gross im Vergleich zu den für die Zukunft berechneten Veränderungen waren. Zum Beispiel fanden Machenhauer et al. (1998), dass die vom HadCM2- und ECHAM4-Modell unter heutigen Randbedingungen simulierten, regional und jahreszeitlich gemittelten Temperaturen über dem Alpenraum in allen Jahreszeiten (mit Ausnahme von ECHAM4 im Winter) statistisch signifikant von den gemessenen Werten abwichen. Die Abweichungen betragen je nach Modell und Jahreszeit zwischen -0.5 und -2.8 °C. Signifikante Abweichungen für den Niederschlag wurden für das HadCM2-Modell für den Sommer (-11% bis -22%, je nach

Definition des heutigen Klimas) und für das ECHAM4-Modell für den Frühling (-22%), Sommer (-35%) und Herbst (-26%) gefunden. All diese Abweichungen gingen zum grossen Teil auf Fehler bei der Simulation der bodennahen atmosphärischen Zirkulation über Europa zurück (Machenhauer et al. 1998).

Bei der Klimaregionalisierung mithilfe von RegCMs sind viele der oben erwähnten Modellierungsprobleme bei einer höheren Auflösung wieder anzutreffen. Hinzu kommt, dass die Fehler der globalen Modelle nicht lediglich übernommen, sondern in gewissen Fällen sogar verstärkt werden können. So ergaben sich bei den von Machenhauer et al. (1998) untersuchten regionalen Simulationen für die saisonal und über das ganze Alpengebiet gemittelten Temperaturen in allen ausser zwei Fällen (HadRM2- und HIRHAM4-Modell im Winter) statistisch signifikante Abweichungen von den Messdaten, die im Bereich zwischen -2.2 und +1.2 °C lagen. Beim Niederschlag wurden für das HadRM2-Modell für alle Jahreszeiten signifikante Abweichungen gefunden (Winter und Frühling um +41%, Sommer +8%, Herbst +28%), während beim ARPEGE-Modell grössere Fehler im Winter und Frühling (um +28%) und beim HIRHAM4-Modell im Sommer (-25%) und Herbst (+17%) diagnostiziert wurden (Machenhauer et al. 1998).

Bei den statistischen Regionalisierungsverfahren sind ebenfalls eine Reihe von grösseren Problemen zu beachten. Erstens basierten die berechneten Szenarien in vielen Fällen (wie z. B. für die Sommerniederschläge) nur auf sehr schwachen statistischen Zusammenhängen zwischen dem gross- und kleinräumigen Klima (siehe z. B. Gyalistras et al. 1994, Enke und Spekat 1997, Huth 1997b, Neidhöfer, 1999). Zweitens wurde zur Berechnung der Szenarien angenommen, dass die für das heutige Klima gefundenen Zusammenhänge auch unter zukünftigen Bedingungen gültig bleiben. Ferner ist nicht sicher, dass zur Berechnung der Szenarien alle relevanten Einflussfaktoren einbezogen wurden. Insbesondere wurden bei keinem der uns zur Verfügung stehenden Szenarien mögliche Veränderungen des atmosphärischen Feuchtegehalts explizit berücksichtigt. Dies könnte bei der Abschätzung der Niederschlagsszenarien grössere Fehler zur Folge gehabt haben (z. B. Schär et al. 1996, Charles et al. 1999).

Die genannten Probleme trugen dazu bei, dass in vielen Fällen, je nachdem ob, und wenn ja, welches Regionalisierungsverfahren verwendet wurde, stark unterschiedliche Szenarien berechnet wurden. Zum Beispiel betragen die aus der ECH1/GHG-Simulation regionalisierten Temperaturveränderungen für den Sommer je nach verwendeter Methode zwischen 2.2 °C bis 5.5 °C und die regionalisierten Niederschlagsveränderungen lagen für den Winter zwischen 1% und 48% und für den Sommer zwischen -40% und +14% (Tab. 4.7). Weitere Beispiele für grössere Unterschiede zwischen den

Resultaten aus den verschiedenen Regionalisierungsmethoden sind in den Figuren 4.6 und 4.10 zu finden.

Das genaue Verständnis dieser Unterschiede wird leider durch erhebliche methodische Probleme erschwert. So wurden die Szenarien für verschiedene Regionen berechnet, oder je nach Szenario wurden auch unterschiedliche Perioden zur Definition des heutigen (Referenz-) und zukünftigen Klimas verwendet (Tab. 4.7). Ferner wurden in vielen Szenarien nur wenige simulierte Jahre unter zukünftigen Klimabedingungen betrachtet. In sechs Szenarien wurden nur fünf Jahre, in zehn Szenarien nur neun bis zehn Jahre und lediglich in sechs Szenarien 20 bis 30 Jahre verwendet (siehe Kapitel 4.4.2.). Dies hat beträchtliche Unsicherheiten beim Vergleich der Szenarien zur Folge (Tab. 4.4 und 4.5).

Klimatische Sensitivität des Alpenraums

Allgemeine Bemerkungen

Die gefundenen Sensitivitäten für die Temperatur und die Streubreiten von Veränderungen für den Niederschlag sind nur als grobe Abschätzungen zu verstehen, die eine Vielzahl von Annahmen und Unsicherheiten beinhalten. Die den Szenarien zugrundeliegenden globalen Temperaturanomalien ΔT_g hängen in erster Linie von drei Faktoren ab: von den verwendeten Forcing-Szenarien, von den globalen Sensitivitäten der betrachteten globalen Klimamodelle sowie von den gewählten Perioden, beziehungsweise Zeitpunkten zur Definition des Referenz- und zukünftigen Klimas. Eine detailliertere Auswertung der Szenarien, z. B. separat für jedes Forcing, schien uns wegen der relativ kleinen Anzahl von Studien nicht sinnvoll. Eine genaue Beantwortung der Frage, inwieweit die Schätzungen für die klimatische Sensitivität des Alpenraums von den oben erwähnten drei Faktoren abhängen, bleibt somit späteren Studien vorenthalten.

Die Unterschiede der Szenarien für ein gegebenes ΔT_g gingen vor allem auf zwei weitere Faktoren zurück: auf die unterschiedlichen Reaktionen der globalen Klimamodelle über dem Nordatlantik und Europa (siehe Kapitel 4.2.), sowie auf die Unsicherheiten bei der Klimaregionalisierung (siehe vorheriger Abschnitt). Eine genauere quantitative Analyse des relativen Beitrags dieser zwei Faktoren an die bestehende Gesamtunsicherheit war bei der gegebenen Datenbasis ebenfalls nicht gut möglich. Die grossen Streubreiten der Resultate, die aufgrund dieser zwei Faktoren jeweils festgestellt wurden, legen jedoch nahe, dass für eine bessere Voraussage der bei einem gegebenen Forcing-Szenario zu erwartenden regionalen Klima-anomalien weitere

Fortschritte sowohl bei der globalen Klimamodellierung und auch bei der Klimaregionalisierung nötig sind.

Praktisch alle verfügbaren Szenarien zeigten, dass das Klima im Alpenraum nicht gleichmässig auf die globale Erwärmung reagieren dürfte, sondern dass je nach Jahreszeit und Region mit ganz unterschiedlichen Veränderungen zu rechnen ist (z. B. Fig. 4.7 und 4.9). Die jahreszeitliche Variabilität in den Szenarien wurde in erster Linie durch entsprechende saisonale Unterschiede in den Resultaten der globalen Klimamodelle verursacht (nicht gezeigt). Die gefundene räumliche Variabilität hingegen dürfte vor allem auf die komplexe Topographie des Alpenraums sowie auf die Lage der Alpen zwischen Ozean und Kontinent in zonaler sowie zwischen Mittelmeer- und Mittelbreitenklima in meridionaler Richtung zurückzuführen sein. Ähnlich komplexe Veränderungsmuster wie sie in den Szenarien vorkommen sind auch in den Analysen vergangener Klimatrends (z. B. Widmann und Schär 1997, Schönwiese und Rapp 1997) für den Alpenraum zu finden. Ein Vergleich der gemessenen Trends mit den in den Szenarien gefundenen Mustern wäre aufschlussreich, würde aber den Rahmen der vorliegenden Arbeit sprengen.

Die schweizerischen Szenarien zeigten stark unterschiedliche Reaktionen auf der Alpennord- und Alpensüdseite (Fig. 4.9). Dieses Resultat scheint aufgrund der Rolle der Alpen als zeitweilige Wetter- und Klimascheide insgesamt plausibel. Interessanterweise wurden bei Verwendung der immer gleichen statistischen Regionalisierungsmethode (*CCA[SLP&T]*) unabhängig vom verwendeten Forcing oder globalen Klimamodell immer sehr ähnliche Muster erhalten, wie sie in Figur 4.9 gezeigt werden (siehe auch Fig. 4.10, sowie Gyalistras et al. 1994 und 1998). Eine genauere Analyse zeigte, dass diese Muster sowohl für die Temperatur als auch für den Niederschlag in erster Linie auf die durch die globalen Modelle vorgegebenen Veränderungen des grossräumigen Temperaturfelds zurückgingen, während die bei der Regionalisierung ebenfalls berücksichtigten Zirkulationsanomalien eher von sekundärer Bedeutung waren (Gyalistras et al. 1994, Fischlin und Gyalistras 1997). Die schweizerischen Szenarien werden weiter unten noch näher diskutiert.

Bei mehreren Szenarien waren die berechneten Veränderungen eng mit der Jahr-zu-Jahr Variabilität des Klimas verknüpft. So beträgt die Standardabweichung der monatlichen Temperaturmittel im Mittel über alle Monate und alle 32 betrachteten Klimastationen auf der Alpennordseite (grösste Erwärmung in den Schweizer Szenarien, Fig. 4.9) 1.7 °C, im Mittel über alle Monate und alle acht betrachteten Klimastationen auf der Alpensüdseite hingegen nur 1.5 °C. Der Variationskoeffizient der monatlichen Niederschlagssummen beträgt auf der Alpennordseite im Mittel 53%, auf der Alpensüdseite (grösste

Niederschlagszunahmen) hingegen 63%. Ein ähnliches Bild ergibt der Vergleich der jahreszeitlich und regional gemittelten Temperaturen und Niederschläge für den Alpenraum und ganz Europa (Kapitel 4.4.3. sowie Tabellen 3A und 3B in Machenhauer et al. 1998). Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die grössten Veränderungen häufig in den Regionen mit der grössten Jahr-zu-Jahr Variabilität berechnet wurden. Dies lässt generell auf eine grosse klimatische Sensitivität für den Alpenraum schliessen.

Temperatur

Bei der Temperatur wurde für den gesamten Alpenraum eine grössere Sensitivität als für die Schweiz erhalten (Regressionsgeraden in Fig. 4.11). In Anbetracht der grossen räumlichen Variabilität des Alpenklimas könnte dies durchaus der Realität entsprechen. Allerdings ist zu beachten, dass alle Schweizer Szenarien mittels eines statistischen Verfahrens berechnet wurden, während die Szenarien für den gesamten Alpenraum allesamt auf Simulationen mit regionalen Klimamodellen zurückgingen. Die gefundenen Unterschiede könnten somit allein durch die Wahl der Regionalisierungsmethode bedingt sein. Zum Beispiel ist es möglich, dass bei der statistischen Regionalisierung, die lediglich auf monatlich gemittelten Daten basierte, die Auswirkungen von verschiedenen für das Alpenklima wichtigen, nichtlinearen Prozessen unterschätzt oder fehlerhaft extrapoliert wurden.

Ein Beispiel für die Verstärkung des Temperatursignals über dem Alpenraum aufgrund eines solchen Prozesses ist in Szenario Nr. 9 (Tab 4.7) zu finden. In diesem Szenario nahm die Erwärmung für den Winter und Frühling mit der Höhe zu. Dieser Effekt ging vor allem auf die simulierte Abnahme der Schneedecke zurück, die eine Verringerung der Albedo an der Erdoberfläche zur Folge hatte. Dadurch wurden die simulierte Erwärmung und Schneeschmelze weiter verstärkt (Giorgi et al. 1997). Bei den statistisch regionalisierten Szenarien für die Schweiz hingegen wurde keine entsprechende Höhenabhängigkeit der Erwärmung gefunden (nicht gezeigt).

Die Gründe für diesen Widerspruch sind nicht klar. Einerseits könnten methodische Probleme eine Rolle spielen. So wurden bei den statistisch regionalisierten Szenarien lediglich sieben Standorte in einer Höhe über 1500 m und nur drei Standorte über 2000 m betrachtet. Andererseits ist die Abschätzung der Schnee-Albedo-Temperatur-Rückkopplung im regionalen Klimamodell, nicht zuletzt aufgrund der immer noch sehr groben Darstellung der alpinen Topographie (siehe z. B. Fig. 4.7), mit grösseren Unsicherheiten behaftet (Giorgi et al. 1997). Zuverlässigere quantitative Angaben könnten

möglicherweise aus einem systematischen Vergleich der beiden Regionalisierungsverfahren gewonnen werden.

Ein weiteres Beispiel, bei dem eine besonders starke Erwärmung über dem Alpenraum berechnet wurde, ist in Szenario Nr. 6 zu finden. Hier führte im verwendeten Klimamodell die sommerliche Austrocknung des Bodens über den kontinentalen Landflächen und insbesondere über dem Alpenraum zu einer Reduktion der Evapotranspiration und der Wolkenbedeckung. Durch die geringere Verdunstung bei gleichzeitig verstärkter Einstrahlung wurden die simulierte Erwärmung und Niederschlagsabnahme weiter verstärkt (Wild et al. 1997). Die Verwendung eines anderen Klimamodells (Szenario Nr. 10), sowie eines statistischen Regionalisierungsverfahrens (Szenario Nr. 18) ergaben jedoch für die gleiche globale Simulation weit kleinere Temperaturzunahmen. Diese beiden Szenarien könnten insgesamt glaubwürdiger sein, da der erwähnte Rückkopplungseffekt in Szenario Nr. 6 aufgrund von grösseren systematischen Fehlern bei der Simulation des heutigen Klimas vermutlich überbewertet wurde (Wild et al. 1997).

Die Schweizer Szenarien zeigten auf der Alpennordseite eine stärkere Erwärmung als auf der Alpensüdseite (Fig. 4.9). Ein möglicher Grund könnte sein, dass die Temperaturen auf der Alpennordseite viel stärker von der Advektion von Luftmassen aus den hohen Breiten und dem Inneren des Kontinents abhängen. Dies aber sind die Gebiete, in denen die globalen Modelle typischerweise die grössten Temperaturanstiege simulieren (Kattenberg et al. 1996). Für diese Hypothese spricht auch, dass für den Winter, wo die Advektion eine grössere Rolle spielt, grössere Nord-Süd-Unterschiede als für den Sommer berechnet wurden (Fig. 4.9). Dabei scheint es so zu sein, dass mögliche Zunahmen in den Häufigkeiten «kalter» Wetterlagen durch die besonders starke Erwärmung in den Ursprungsgebieten der herangeführten Luftmassen mehr als kompensiert werden. Auch in diesem Fall scheinen uns jedoch in Anbetracht der Unsicherheiten bei der statistischen Regionalisierung noch weitere Untersuchungen, insbesondere der Vergleich mit regionalen Klimasimulationen, nötig.

Niederschlag

Beim Niederschlag (Fig. 4.12) wurde im Gegensatz zur Temperatur keine so deutliche Abhängigkeit von der Stärke des globalen Temperaturanstiegs gefunden. Auch waren die berechneten Niederschlagsveränderungen in vielen Fällen statistisch nicht signifikant (Kapitel 4.4.3. sowie Fig. 4.8). Allerdings gibt es mindestens zwei Gründe, warum die erhaltenen Veränderungen nicht als vernachlässigbar angesehen werden sollten:

Erstens lag bei den verfügbaren Stichprobengrößen die Schwelle für signifikante Veränderungen ziemlich hoch, zwischen zirka 10% und 20% (Tab. 4.5). Diese Werte sind in der selben Größenordnung wie die Streubreiten der verschiedenen Szenariowerte (Fig. 4.12) und insbesondere auch in der selben Größenordnung wie die Standardabweichungen der saisonalen Niederschläge (Tab. 4.4). Unter der Annahme einer Normalverteilung würde die Verschiebung des Erwartungswerts um eine Standardabweichung bedeuten, dass die zukünftigen Niederschläge in 50% der Fälle um mindestens so viel vom heutigen Mittel abweichen, wie dies unter heutigen Bedingungen für lediglich 16% der Ereignisse der Fall ist. Solche Veränderungen dürften in vielen Sektoren grössere Auswirkungen zur Folge haben.

Zweitens deuten die verfügbaren Studien darauf hin, dass sich nicht nur die Erwartungswerte, sondern gleichzeitig auch die Variabilität des Niederschlags ändern könnten. Ähnliche starke Zunahmen der starken Niederschlagsereignisse wie sie in der *SENS2K*-Studie (Frei et al. 1998) berechnet wurden, ergaben sich zum Teil auch in anderen Simulationen mit globalen (z. B. Gregory und Mitchell 1995, Cubasch et al. 1995, Zwiers und Kharin 1998) sowie regionalen Klimamodellen (z. B. Jones et al. 1997). Zukünftige Zirkulationsveränderungen könnten insbesondere zu einer Verstärkung, aber auch zu einer Umkehrung der von Frei et al. (1998) gefundenen Veränderungen führen. Ein Beispiel für eine mögliche Abnahme der starken Niederschlagsereignisse ist im Szenario *ECH4/GHG/2085–1985+2xREWIH3D* zu finden.

Die Schweizer Szenarien zeigten auch beim Niederschlag einige grössere regionale Unterschiede (Fig. 4.9 und 4.10). Diese deuten darauf hin, dass die Alpensüdseite besonders sensitiv auf die zu erwartende Zunahme des atmosphärischen Feuchtegehalts (Kattenberg et al. 1996) in einer wärmeren Atmosphäre reagieren könnte. Diese erhöhte Sensitivität könnte auf die unmittelbare Nähe des Mittelmeers zurückzuführen sein, das in allen Jahreszeiten ein praktisch unerschöpfliches Feuchtereservoir darstellt.

Die Rolle der mediterranen Luftmassen für den Niederschlag auf der Alpensüdseite ist jedoch unseres Wissens selbst für das heutige Klima noch nie quantitativ untersucht worden. Ebenfalls unklar ist, inwieweit die in der CCA(SLP&T)-Prozedur berechneten Niederschlagszunahmen, die vor allem durch das grossräumige Temperatursignal bewirkt wurden, physikalisch konsistent sind. Insbesondere ist die Annahme, wonach die grossräumige Temperaturverteilung einen guten Indikator für den atmosphärischen Feuchtegehalt der dem Alpenraum zugeführten Luftmassen darstellt (Gyalistras et al. 1994), bisher noch nicht überprüft worden.

4.4.6. Fazit

Bestandesaufnahme von Szenarien für den Alpenraum

Für den Alpenraum existiert mittlerweile eine Vielzahl von Klimaszenarien, die mittels aller gängiger Regionalisierungsmethoden berechnet wurden. Etliche dieser Szenarien beruhen auf zeitabhängigen Simulationen mit gekoppelten, atmosphärisch-ozeanischen globalen Klimamodellen. Einige der Szenarien berücksichtigen auch den kühlenden Effekt der Sulfataerosole.

Trotz der in den letzten Jahren erzielten Fortschritte sind noch erhebliche Lücken in unserem Wissensstand festzustellen: So basieren alle heute verfügbaren Szenarien auf Simulationen mit lediglich sechs verschiedenen globalen Modellen. Der Grossteil dieser Simulationen wurde vor drei oder mehr Jahren durchgeführt. Die Szenarien widerspiegeln zudem nur ein sehr beschränktes Spektrum an Annahmen über das zukünftige Forcing durch Treibhausgase. Das direkte Forcing durch Sulfataerosole wurde nur in einer einzigen, das indirekte Sulfataerosol-Forcing in keiner der verwendeten globalen Simulationen berücksichtigt. Ferner wurden alle verfügbaren Szenarien nur für isolierte zukünftige Zeitfenster berechnet, so dass keine genaueren Angaben zur möglichen zeitlichen Entwicklung der Klimaveränderung in den Alpen vorliegen. Schliesslich sind bisher noch kaum Szenarien zu möglichen Veränderungen der natürlichen Klimavariabilität, zu möglichen raschen Wechseln zwischen verschiedenen globalen Klimazuständen oder zu extremen Wetterereignissen erarbeitet worden.

Die vorliegenden Resultate dürften somit die tatsächlich vorhandenen Unsicherheiten bei der Abschätzung des zukünftigen Klimas der Alpen eher unter- als überschätzen. Um die vielen vorliegenden Informationen aus den bisher durchgeführten sowie ständig neu hinzukommenden globalen Simulationen optimal zu nutzen, sind noch weitere Szenarien für den Alpenraum zu berechnen und zu analysieren.

Klimatische Sensitivität des Alpenraums

Die von uns untersuchten Szenarien lassen für den Alpenraum in den nächsten Jahrzehnten eine generelle Erwärmung und im Jahresmittel eher feuchtere Verhältnisse erwarten. Die errechneten Veränderungen waren für die saisonalen Temperaturen in allen Fällen, für die saisonalen Niederschlagssummen hingegen nicht immer statistisch signifikant. Es gibt jedoch Hinweise, dass selbst relativ kleine, statistisch nur schwer feststellbare Verände-

rungen des langjährig mittleren Niederschlags je nach Jahreszeit mit grösseren Zu- oder Abnahmen in den Häufigkeiten von Starkniederschlägen einhergehen dürften.

Gemäss unserer Analyse könnte der globale Temperaturanstieg im Mittel über den gesamten Alpenraum in allen Jahreszeiten verstärkt werden. Für das schweizerische Gebiet deuten die Szenarien hingegen auf eine generelle Abschwächung des globalen Signals hin. Die Gründe für diese Unterschiede sind nicht bekannt. Möglicherweise spielt die Wahl der Regionalisierungsmethode eine entscheidende Rolle (positive Rückkopplungs- bei den dynamischen versus Mittelungseffekte bei den statistischen Regionalisierungsverfahren). Die Erwärmung könnte im Winter und im Frühling mit der Höhe zunehmen und auf der schweizerischen Alpennordseite stärker als auf der Alpensüdseite ausfallen.

Für den Niederschlag wurden in den Szenarien je nach Annahmen zum Teil komplett entgegengesetzte Veränderungen berechnet. Es liessen sich jedoch die folgenden Tendenzen feststellen: Im Winter ist für den gesamten Alpenraum und für die Schweiz eher mit einer Zunahme des Niederschlags zu rechnen. Ferner könnte der Niederschlag auf der schweizerischen Alpennordseite im Herbst und auf der Alpensüdseite in allen Jahreszeiten zunehmen.

Probleme

Die erhaltenen Veränderungen sind in Anbetracht der vielen jeweils getroffenen Annahmen, der systematischen Fehler der globalen Klimamodelle sowie der zahlreichen bei der Klimaregionalisierung auftretenden Probleme vorsichtig zu beurteilen. Die Wahl des Regionalisierungsverfahrens hatte in einzelnen Fällen einen ähnlich grossen Effekt auf die resultierenden Szenarien wie die Wahl des Forcing-Szenarios, des zukünftigen Zeitpunktes, oder des globalen Klimamodells.

In den zwei untersuchten Simulationen mit und ohne Sulfataerosol-Forcing liessen sich die unter dem Sulfataerosol-Forcing erhaltenen regionalen Veränderungen nicht durch eine einfache Umskalierung der unter dem Nur-Treibhausgas-Forcing berechneten Resultate voraussagen. Da die meisten bis heute verfügbaren Szenarien lediglich die möglichen Auswirkungen eines Nur-Treibhausgas-Forcings berücksichtigen, ist nicht auszuschliessen, dass nach der Auswertung von weiteren, neueren globalen Simulationen die in der vorliegenden Arbeit gefundenen Tendenzen revidiert werden müssen.

Das Verständnis und der Vergleich der verschiedenen Szenarien wurden durch methodische Probleme stark erschwert. Ein systematischer Vergleich der verschiedenen Regionalisierungsverfahren könnte dazu beitragen, die Spannbreiten der unter einem bestimmten Forcing-Szenario zu erwartenden Veränderungen besser einzugrenzen.

Bedeutung für Klimawirkungsstudien

Unsere Untersuchung bestätigte erneut, dass im Alpenraum mit räumlich wie jahreszeitlich stark variierenden Klimaveränderungen zu rechnen ist. Das in gewissen Klimawirkungsstudien immer wieder anzutreffende Vorgehen, von stark vereinfachten Szenarien auszugehen, scheint daher fragwürdig. An dessen Stelle sollten trotz aller Unsicherheiten bevorzugt die hier vorgestellten Szenarien verwendet werden, die physikalisch konsistenter sind, da sie auf zahlreichen theoretischen und empirischen Kenntnissen über das Klimasystem basieren.

Die Frage, ob gewisse der hier vorgestellten Szenarien besonders wahrscheinlich sind, ist nicht einfach zu beantworten. Es ist prinzipiell unmöglich, eine objektiv nachprüfbare Wahrscheinlichkeit oder einen genauen Zeitpunkt für das Eintreten eines bestimmten Szenarios anzugeben. Auch ist die Beurteilung der physikalischen Konsistenz eines jeden einzelnen Szenarios aufgrund der Komplexität des Klimasystems und der vielen auftretenden Unsicherheiten mit zahlreichen Schwierigkeiten verbunden.

Bei einem fest vorgegebenen Forcing-Szenario sind jedoch in der Regel die neueren Szenarien den älteren Berechnungen vorzuziehen. Ansonsten glauben wir, dass *alle Szenarien zusammengenommen* unseren momentanen Kenntnisstand zur Klimaveränderung im Alpenraum immer noch am besten widerspiegeln. Für Klimawirkungsstudien bedeutet dies, dass immer die Konsequenzen von möglichst vielen Szenarien gleichzeitig zu untersuchen sind.



Palmen oder Gletscher – in welche Richtung steuert das alpine Klima? Eine aktuelle, aber keineswegs neue Frage, wie die Titelseite aus einem 1919 erschienenen populärwissenschaftlichen Büchlein zeigt (Bölsche 1919, vgl. Brönnimann 1999).