

9. Herleitung stündlicher Wetterszenarien unter zukünftigen Klimabedingungen

D. GYALISTRAS¹, A. FISCHLIN¹ und M. RIEDO²

9.1 Einleitung

Dynamische Simulationsmodelle stellen wichtige Hilfsmittel dar, um mögliche Auswirkungen einer zukünftigen Klimaänderung auf z.B. ökologische, ackerbauliche oder hydrologische Systeme zu untersuchen (Carter *et al.*, 1994). Viele dieser Modelle benötigen jedoch lokale Wettereingangsdaten mit einer täglichen oder gar stündlichen Auflösung. So ist z.B. das innerhalb des Projektes *Reaktion von Grünland-Ökosystemen auf Klimaveränderungen* (REGÖK) entwickelte Simulationsmodell auf die Vorgabe stündlicher Niederschlagssummen, sowie Stundenmittel der Globalstrahlung, der Temperatur, des Dampfdrucks und der Windgeschwindigkeit für mindestens die gesamte Dauer der Vegetationsperiode angewiesen. Um ein solches Modell für Klimawirkungsstudien einzusetzen, stellt sich somit die Aufgabe, mögliche stündliche Wetterverläufe, wie sie unter einem zukünftigen Klima auftreten könnten, herzuleiten.

Im vorliegenden Beitrag wird erstens eine neue Methode vorgestellt, um zu vorgegebenen klimatischen Randbedingungen zugehörige mögliche stündliche Wetterverläufe an einem einzelnen Standort zu simulieren. Die Methode wird im Rahmen des REGÖK-Projekts fallstudienartig getestet. Zweitens werden zwei auf die Bedürfnisse des REGÖK-Simulationsmodells zugeschnittene Szenarien einer möglichen zukünftigen Klimaänderung im Schweizerischen Mittelland hergeleitet und diskutiert.

Aufgrund der Komplexität und Nichtlinearität des Klimasystems sind Wettervorhersagen auf maximal 8-10 Tage begrenzt, so dass der mögliche Verlauf des Wetters über die nächsten Jahrzehnte bestenfalls in einem statistischen Sinn vorhergesagt werden kann (z.B. Hasselmann, 1990). Jede globale Klimaprognose ist hierbei mit sehr grossen grundsätzlichen Unsicherheiten behaftet (Houghton *et al.*, 1990, 1992; Gates *et al.*, 1992) und hängt zudem entscheidend von einer Reihe schwer voraussagbarer Eingangsgrössen, wie z.B. den zukünftigen

¹ Institut für Terrestrische Ökologie, ETH Zürich, CH-8952 Schlieren

² Institut für Umweltschutz und Landwirtschaft, CH-3097 Liebefeld

Cite as:

GYALISTRAS, D., FISCHLIN, A. & RIEDO, M. (1997). Herleitung stündlicher Wetterszenarien unter zukünftigen Klimabedingungen. In: Fuhrer, J. (ed.), *Klimaänderung und Grünland - eine Modellstudie über die Auswirkungen zukünftiger Klimaveränderungen auf das Dauergrünland in der Schweiz*. vdf, Hochschulverlag AG an der ETH Zürich, pp. 207-276.

tigen Emission von Treibhausgasen oder Sulfataerosolen, ab (Houghton *et al.*, 1992, 1994).

Aus diesen Gründen können für das Wetter der kommenden Jahrzehnte keine Vorhersagen, sondern bestenfalls denkbare Verläufe in Form sogenannter Wetterszenarien angegeben werden. Wetterszenarien sind in sich konsistente – d.h. mit unserem Wissen über Wetter, Klima und Klimaänderung verträgliche – Beschreibungen möglicher zukünftiger Wetterverläufe, welche aufgrund wohldeklarer Annahmen und unter Anwendung einer logischen Methode konstruiert werden (z.B. Viner & Hulme, 1993; Carter *et al.*, 1994).

Im Rahmen der vorliegenden Fallstudie war bei der Konstruktion der Wetterszenarien eine Reihe wichtiger Nebenbedingungen zu beachten. Erstens zeigten Voruntersuchungen, dass das REGÖK-Simulationsmodell teilweise sehr sensitiv auf bereits kleine Abänderungen in den Mittelwerten oder den Varianzen gemessener Wetterdaten reagierte. Dies war im Einklang mit den Ergebnissen, welche z.B. Nonhebel (1994a,b) mit einem anderen Agroökosystem-Modell erhalten hatte und liess darauf schliessen, dass hohe Anforderungen im Hinblick auf die Realitätsnähe der Wetterszenarien bestanden. Zweitens sollten Szenarien für eine genügend grosse Anzahl (≥ 10) von Jahren erstellt werden, so dass es möglich sein sollte, die Auswirkungen der jährlichen Schwankungen des Wetters auch unter einem geänderten Klima zu untersuchen. Drittens stellte sich die Aufgabe, Veränderungen des Wetters regional differenziert darzustellen, so dass räumlich konsistente Aussagen über die mögliche Verteilung der Auswirkungen einer Klimaänderung innerhalb des Schweizerischen Mittelandes gewonnen werden könnten. Schliesslich sollte die verwendete Methode genügend flexibel und effizient sein, um eine Vielzahl von Simulationsexperimenten mit dem REGÖK-Simulationsmodell unter verschiedensten Annahmen, nicht nur über eine zukünftige Klimaänderung, sondern auch über weitere, möglicherweise sich ebenfalls ändernde Faktoren, wie z.B. die physiologischen Eigenschaften der Pflanzen, oder die Bewirtschaftung, zu ermöglichen.

Zur Konstruktion regionaler Klima- und Wetterszenarien steht eine Vielzahl von Methoden zur Auswahl, die z.B. in Lamb (1987), Robinson & Finkelstein (1991), Giorgi & Mearns (1991), Robock *et al.* (1993), Pittock (1993), Viner & Hulme (1993), Carter *et al.* (1994), von Storch (1995) und Gyalistras *et al.* (1997) diskutiert werden. Die verschiedenen Methoden lassen sich grob in rein empirische Methoden und in Methoden, welche auf Experimente mit numerischen Klimamodellen basieren, einteilen.

Zu den empirischen Methoden zählen zeitliche Analogien (bei welchen vergangene Klimaschwankungen als Analogien für eine zukünftige Klimaänderung

herangezogen werden), räumliche Analogien (Klima- oder Wetterparameter eines interessierenden Standorts werden gemäss Messungen aus benachbarten, z.B. wärmeren, Standorten abgeändert) und die willkürliche Abänderung von Messreihen (z.B. das Vorschreiben einer Temperaturänderung von $\pm 2^\circ\text{C}$). Rein empirische Szenarien können mit relativ wenig Aufwand konstruiert werden und sind deswegen wichtige Hilfsmittel für erste Sensitivitäts- und Plausibilitätsstudien mit Klimawirkungsmodellen. Sie weisen jedoch den Nachteil auf, dass sie viele bestehende Kenntnisse und Kausalitäten entlang der Wirkungskette *anthropogene Einflüsse auf das Klimasystem – Veränderung des globalen Klimas – Veränderungen des regionalen Klimas und Wetters* ausser Acht lassen. Insbesondere ist es nicht möglich, lokale Klimaänderungen auf eine physikalisch basierte Weise aus spezifischen Annahmen über die möglichen Ursachen einer globalen Klimaänderung herzuleiten (s.a. Giorgi & Mearns, 1991).

Um physikalisch konsistentere Szenarien zu konstruieren wird deswegen allgemein empfohlen (Carter *et al.*, 1994) auf Modellrechnungen mit globalen Klimamodellen zurückzugreifen. Unter den verschiedenen Arten von Klimamodellen (siehe z.B. Henderson-Sellers & McGuffie, 1987) gelten die drei-dimensionalen, gekoppelten atmosphärisch- (z.B. Washington & Parkinson, 1986) ozeanischen (z.B. Semtner, 1995) Generellen Zirkulationsmodelle (GCM) als die derzeit vollständigsten Werkzeuge, um Abschätzungen möglicher globaler Klimaänderungen durchzuführen (Gates *et al.*, 1990, 1992).

Der Gebrauch von GCMs setzt allerdings auch den Gebrauch einer Prozedur voraus, um von der globalen Skala, auf welcher diese Modelle einigermaßen zuverlässige Angaben liefern, auf regionale oder gar lokale Klimaänderungen zu schliessen (Giorgi & Mearns, 1991; Grotch & MacCracken, 1991; von Storch *et al.*, 1993). Dieser Schritt ist im Fall der Alpen, die nicht nur eine sehr kleinräumige Topographie aufweisen, sondern auch in der komplexen Übergangszone zwischen dem gemässigten Klima der mittleren Breiten einerseits und dem Mittelmeerklima andererseits liegen, besonders wichtig.

Zur Regionalisierung globaler Klimaänderungen aus GCMs stehen grundsätzlich zwei Möglichkeiten zur Verfügung. Die erste besteht darin, regionale Klimamodelle (RegCM; z.B. Giorgi *et al.*, 1992; Beniston *et al.*, 1995; Frey-Buness *et al.*, 1995; Marinucci *et al.*, 1995; Jones *et al.*, 1995; Schär *et al.*, 1996) oder räumlich sehr hoch aufgelöste globale Klimamodelle (z.B. Beniston *et al.*, 1995) mit Randbedingungen, die aus Klimaänderungs-Simulationen mit grob aufgelösten GCMs entnommen werden, anzutreiben. Die zweite Möglichkeit besteht darin, die von GCMs simulierten Klimaänderungen anhand empirischer Zusammenhänge zwischen dem grossräumigen und dem regionalen Klima zu interpretieren.

RegCMs bieten den Vorteil, dass mögliche Veränderungen des regionalen Klimas auf physikalischer Basis ermittelt werden. Insbesondere beinhalten RegCMs Beschreibungen kleinräumiger Prozesse (wie z.B. des regionalen Wasserkreislaufs oder der Interaktion heranrückender Fronten mit der Orographie), die für das regionale Klima wichtig, in GCMs jedoch nur unzureichend oder gar nicht berücksichtigt sind. Allerdings gab es eine Reihe von Gründen, welche die Brauchbarkeit von RegCMs für die vorliegende Anwendung stark einschränken:

Erstens liegt die horizontale Maschenweite der heute am höchsten aufgelösten RegCMs bei maximal 10-20 km (z.B. Cress *et al.*, 1994; Marinucci *et al.* 1995). Dabei ist davon auszugehen (z.B. von Storch *et al.*, 1993), dass die Modelle erst bei einem Vielfachen dieser Maschenweite, d.h. >100 km, einigermaßen zuverlässige Angaben über die Auswirkungen einer Klimaänderung liefern können. Somit wäre es ohne weiterreichende Interpretation der Modellresultate nicht möglich gewesen, regional differenzierte Aussagen für das Schweizerische Mittelland herzuleiten. Zweitens, obwohl RegCMs mit einem Zeitschritt von einigen Minuten (oder weniger) integriert werden, war uns keine Studie darüber bekannt, inwieweit sie das Wetter in der benötigten, stündlichen Auflösung realistisch genug simulieren. Schliesslich sind RegCMs rechenaufwendig, so dass alle bisher vorliegenden Szenarienrechnungen nur einzelne Monate abdecken und davon auszugehen war, dass, selbst bei einer Steigerung der momentanen Rechenkapazitäten, RegCMs auch in Zukunft nur ein beschränktes Spektrum an Wetterszenarien liefern würden.

Somit musste eine empirische Interpretation der GCM-simulierten Klimaänderungen in Betracht gezogen werden. In den letzten Jahren ist eine ganze Reihe solcher Regionalisierungs- (oder *downscaling*-) Methoden vorgeschlagen worden, die sich in der Wahl der verwendeten Transferfunktion (z.B. lineare oder nichtlineare Regressionsgleichungen, neuronale Netzwerke etc.), der zeitlichen Auflösung (z.B. ein Tag oder ein Monat) und der grossräumigen Variablen (z.B. Luftdruck- oder Temperaturverteilungen über verschieden grosse Regionen und auf verschiedenen Niveaus) unterscheiden. Eine nähere Besprechung der verschiedenen Ansätze ist z.B. in Gyalistras *et al.* (1997) zu finden.

Empirische Regionalisierungsprozeduren weisen zwar die Nachteile auf, dass unter Umständen kein starker Zusammenhang zwischen einer regionalen Klimavariablen und dem grossräumigen Klima gefunden werden kann, oder dass sogar eine gute Korrelation unter einem geänderten Klima ihre Gültigkeit verlieren könnte. Nichtsdestotrotz haben mehrere Autoren gezeigt, dass empirische Regionalisierungsprozeduren effiziente und flexible Hilfsmittel darstellen, um physikalisch plausible Abschätzungen über mögliche Klimaänderungen in bestimmten Regionen oder gar an einzelnen Standorten zu erhalten (z.B. von

Storch *et al.*, 1993; Gyalistras *et al.*, 1994; Matyasovszky & Bogardi, 1994; Corte-Real *et al.*, 1995; Zorita *et al.*, 1995).

Für die vorliegende Studie stellte sich die Frage nach der zeitlichen Auflösung mit der eine empirische Klima- bzw. Wetterregionalisierung vorgenommen werden sollte. Die Verwendung täglicher (z.B. Wilson & Lettenmaier, 1992; Bardossy & Plate, 1992; Hewitson, 1994; Zorita *et al.*, 1995) oder sogar stündlicher GCM-Resultate hätte den Vorteil gehabt, dass direkt auf das physikalisch konsistente Wetter eines Klimamodells hätte zurückgegriffen werden können. Dieser Ansatz wurde jedoch nicht weiter verfolgt, weil Grund zur Annahme bestand, dass die in der vorliegenden Studie gestellten hohen Anforderungen an die Realitätsnähe des lokalen Wetters seitens der globalen Klimamodelle (z.B. aufgrund von Problemen in der Simulation von Grosswetterlagen; siehe Hulme *et al.*, 1993), oder der Regionalisierungsprozedur (z.B. aufgrund von Ungenauigkeiten in der Erzeugung von Niederschlagsereignissen und Trockenperioden; Zorita *et al.*, 1995), möglicherweise nicht erfüllt werden könnten. Ein weiterer Nachteil wäre gewesen, dass die Konstruktion der Wetterszenarien sehr stark von der Verfügbarkeit täglicher GCM-Daten abhängen würde, die schwieriger zu erhalten sind als z.B. monatliche Daten. Schliesslich wäre die flexible Formulierung vieler verschiedener Szenarien aufgrund der anfallenden grossen Datenmengen möglicherweise stark eingeschränkt worden.

Aus diesen Gründen wurde entschieden, für die Regionalisierung eine monatliche Auflösung zu wählen. Dies stellte einen Kompromiss zwischen einer genügend hohen Auflösung des Jahreszyklus einerseits, und – dank der gröberen zeitlichen Auflösung – geringeren Präzisionsanforderungen an die GCMs und die Regionalisierungsprozedur andererseits, dar. Aus den verschiedenen im Prinzip zur Verfügung stehenden Methoden wurde diejenige von Gyalistras *et al.* (1994) ausgewählt. Die Gründe waren, dass diese Methode speziell im Hinblick auf die Bedürfnisse von Ökosystemstudien entwickelt und an fünf Schweizer Standorten bereits getestet worden war und dass sie unmittelbar zur Verfügung stand.

Die Wahl dieses Vorgehens führte allerdings auf zwei neue Probleme. Erstens werden zur Herstellung eines empirischen Zusammenhangs zwischen dem globalen und dem lokalen Klima auf beiden Seiten genügend lange Datensätze – bei einer saisonalen oder monatlichen Auflösung mindestens 30-50 Jahre – benötigt (von Storch *et al.*, 1993; Gyalistras *et al.*, 1994). Während im Prinzip für die grossräumigen Klimavariablen genügend lange Datenreihen zur Verfügung standen, lagen an den beiden Standorten des REGÖK-Projekts innerhalb des Schweizerischen Mittellandes, Ostermundigen und Oberbütschel, Messungen aus nur zwei Jahren vor. Um dieses Problem zu umgehen wurde entschieden, zwei langjährige Klimastationen, deren Klimata für die REGÖK-Standorte

bzw. für entsprechende Höhenlagen des Mittellandes repräsentativ sind, zu ermitteln und die Konstruktion der Wetterszenarien, sowie alle weiteren Untersuchungen, an diesen beiden Standorten durchzuführen.

Zweitens, da aus den oben erwähnten Gründen auf eine direkte Regionalisierung des täglichen (oder gar stündlichen) grossräumigen Wetters verzichtet wurde, stellte sich die Frage nach dem Übergang von einer monatlichen zu einer stündlichen Beschreibung des lokalen Wetters. Die wichtigste Möglichkeit dazu besteht in der Verwendung eines sogenannten *Wettergenerators*. Wettergeneratoren bestehen aus stochastischen Zeitreihen- (z.B. Box & Jenkins, 1976) und/oder Markovketten- (z.B. Schneider & Barker, 1968) Modellen, deren Struktur und Parameter aus Messreihen ermittelt werden. Die stochastischen Modelle können dazu benutzt werden, um Mithilfe eines Pseudo-Zufallszahlengenerators aus einer beschränkten Anzahl zeitlich aggregierter Parametern (wie z.B. den Erwartungswerten von Wettervariablen oder den Übergangswahrscheinlichkeiten zwischen verschiedenen Wetterzuständen) eine im Prinzip beliebige Anzahl von Wetterverläufen mit realistischen statistischen Eigenschaften zu generieren.

Wettergeneratoren für mehrere tägliche Wettervariablen sind z.B. von Richardson (1981), Geng *et al.* (1985a,b), Wilks (1992) und Woo (1992), für den täglichen oder stündlichen Niederschlag z.B. von Kavvas & Delleur (1981), Geng *et al.* (1986), Foufoula-Georgiou & Lettenmaier (1987), Wilks (1989a), Burlando & Rosso (1991), Cowpertwait (1991), Gregory *et al.* (1992) und Bo *et al.* (1994), und für die tägliche oder stündliche Globalstrahlung z.B. von Graham *et al.* (1988), Aguiar *et al.* (1988) und Aguiar & Pereira (1992) vorgeschlagen worden. Die Verwendung von Wettergeneratoren im Zusammenhang mit Klimaszenarien wird z.B. von Burlando & Rosso (1991), Wilks (1992) und Katz (1996) behandelt. Es wurde allerdings keine Methode gefunden, welche es gemäss den Bedürfnissen der vorliegenden Studie erlauben würde, Stundenwerte für gleichzeitig mehrere Variablen unter heutigen, oder gar möglichen zukünftigen Klimabedingungen, zu generieren. Aus diesem Grund musste basierend auf die oben genannten Arbeiten ein neuartiger, stündlicher Wettergenerator entwickelt werden, der weiter unten ausführlicher vorgestellt wird.

Zuerst werden die in der vorliegenden Studie entwickelte, allgemeine Methodik zur Herleitung lokaler Wetterszenarien, sowie die Verwirklichung der einzelnen Teilschritte vorgestellt. Im nachfolgenden Abschnitt werden die Validierung des Wettergenerators unter heutigen Klimabedingungen, sowie die Anwendung der Gesamtmethodik an den zwei ausgewählten repräsentativen Standorten präsentiert. In zwei weiteren Abschnitten werden die Brauchbarkeit der Gesamtmethodik sowie die Repräsentativität der Szenarien ausführlich diskutiert.

9.2 Material und Methoden

9.2.1 Gesamtmethodik

Die verwendete Gesamtmethodik besteht erstens aus der Auswahl der repräsentativen Klimastationen und zweitens aus der Herleitung stündlicher Wetterszenarien an diesen Stationen. Die Auswahl der Klimastationen wird in einem nachfolgenden Abschnitt näher besprochen.

Das Vorgehen zur Herleitung der lokalen Wetterszenarien ist übersichtsmässig in Fig. 81 dargestellt. Es besteht aus den folgenden drei Schritten (dunkelgraue Rechtecke in Fig. 81):

- (1) *Herleitung regionaler Klimaszenarien*: mittels einer empirischen Regionalisierungsprozedur werden aus einer GCM-Simulation mögliche Veränderungen in den Erwartungswerten ausgewählter monatlicher Wettervariablen ermittelt (Fig. 81c).
- (2) *Herleitung monatlicher Wetterverläufe*: hierzu werden monatliche Messreihen der lokalen Wettervariablen gemäss den aus der Regionalisierungsprozedur erhaltenen Resultaten abgeändert (Fig. 81d).
- (3) *Herleitung stündlicher Wetterverläufe*: mithilfe eines speziell zu diesem Zweck entwickelten stochastischen Wettergenerators werden aus den monatlichen Wetterverläufen stündliche Wetterverläufe erzeugt (Fig. 81e). Die einzelnen Teilschritte werden weiter unten ausführlicher präsentiert.

Implementierung

Bei der Implementierung des obigen Vorgehens wurde darauf geachtet, alle drei Schritte so weit als möglich zu automatisieren. Dies wurde durch den modularen Aufbau der Gesamtprozedur erleichtert. Jeder Teilschritt wurde mittels eines oder mehrerer speziell dafür entworfener, weitgehend portabler und modular aufgebauter Programme realisiert, welche über Textdateien mit wohldefinierter Syntax miteinander kommunizierten.

Zur Erstellung dieser Programme verwendeten wir die Sprachen FORTRAN 77 und Modula-2, sowie Scripts unter dem Betriebssystem UNIX. Die Programme greifen auf numerische Routinen der NAG-Bibliothek (z.B. Hopkins & Phillips, 1988), sowie Bibliotheksmodule der *Dialog Machine* (Fischlin & Schaufelberger, 1987) zurück. Die Portabilität aller Modula-2 Programme wurde durch die Benutzung der RASS-Programmiersplattform (Thöny *et al.*, 1995) gewährleistet. Die Programme wurden auf SUN-Workstations und Macintosh-PCs entwickelt und betrieben und mittels unabhängiger Software (z.B. kommerziellen Statistik-Programmen) ausführlich getestet. Eine Übersicht der wichtigsten Programme findet sich im Anhang E.

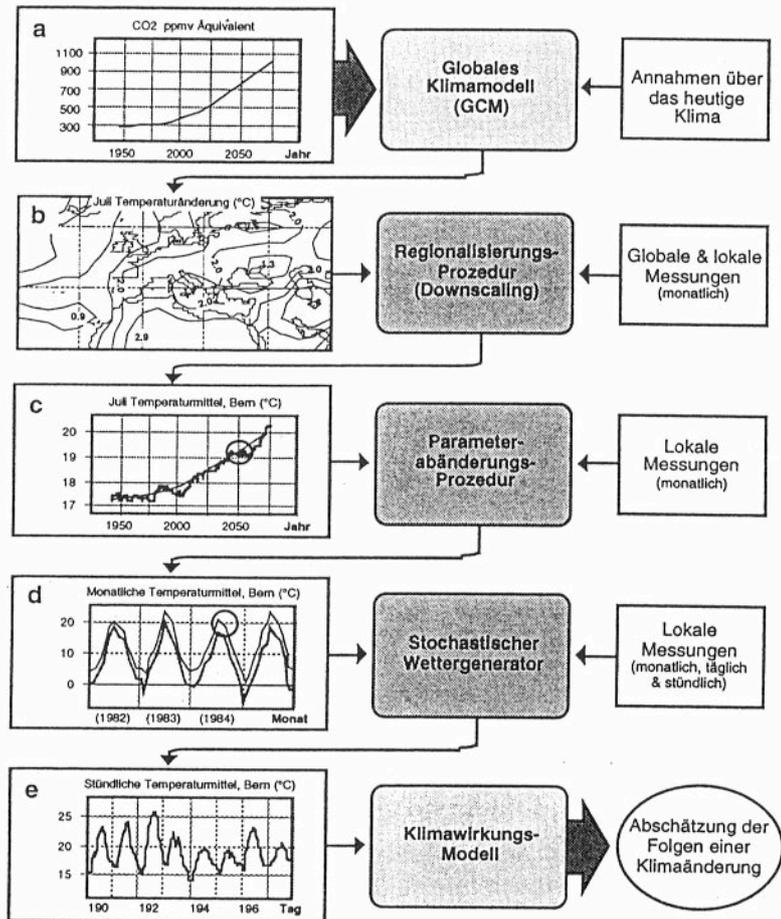


Fig. 81: Vorgehen zur Herleitung stündlicher Wetterszenarien unter möglichen zukünftigen Klimabedingungen.

Links: Beispiele für Ausgangsannahmen, Zwischen- und Endresultate. *Mitte:* Übersicht über die verwendeten Modelle und Prozeduren. *Rechts:* Übersicht über die benötigten Messungen und Zusatzinformationen. (a) – Ausgangsannahmen über Ursachen einer globalen Klimaänderung (diese Studie: Verdoppelung des CO₂-Gehalts); (b) – Beispiel für die Veränderung des monatsmittleren Temperaturfelds über dem Nordatlantisch/Europäischen Sektor aus einer globalen Klimaänderungs-Simulation (diese Studie: Verwendung der Veränderungen des monatsmittleren Temperatur- und Luftdruck-

felds aus Klimaänderungs-Simulationen mit dem ECHAM1/LSG-GCM (Cubasch *et al.*, 1992) und dem CCC-GCMII (Boer *et al.*, 1992)); (c) – Beispiel für die mittels einer statistischen Regionalisierungsprozedur ermittelte, zeitabhängige Veränderung einer monatlichen lokalen Wettervariablen (diese Studie: Anwendung der Regionalisierungsprozedur von (Gyalistras *et al.*, 1994) auf 22 monatliche Variablen zu Temperatur, Niederschlag, Globalstrahlung, Dampfdruck und Windgeschwindigkeit); grau: gleitendes Mittel über 15 Jahre, schwarz: langfristiger Trend, Kreis: zur Erzeugung von Teil-Fig. (d) mitverwendete Information; (d) – Beispiel für die Abänderung der Messreihe einer monatlichen lokalen Wettervariablen; grau: gemessene, schwarz: abgeänderte Zeitreihe, Kreis: zur Erzeugung von TeilFig. (e) mitverwendete Information; (e) – Beispiel für eine mittels stochastischer Simulation erzeugte stündliche Zeitreihe einer lokalen Wettervariablen (diese Studie: Erzeugung stündlicher Zeitreihen für den Niederschlag, sowie die Stundenmittel der Globalstrahlung, der Temperatur, des Dampfdrucks und der Windgeschwindigkeit).

9.2.2 Daten

Globale Daten

Für die Erstellung der Regionalisierungsprozedur verwendeten wir Anomaliefelder des auf Meereshöhe reduzierten monatsmittleren Luftdrucks sowie der monatsmittleren bodennahen Lufttemperatur in der Periode 1901-1980. Die Felder waren durch ein Gitter von 5 x 5 (Länge x Breite) Grad über dem Sektor 40E-40W und 30N-70N (153 Gitterpunkte pro Feld) definiert (siehe auch Fig. 81b). Die Anomalien wurden relativ zu den langjährigen Mittelwerten der Periode 1901-1980 berechnet. Die Luftdruckdaten wurden aus dem täglichen Datensatz des NCAR (siehe Jessel, 1991), die Temperaturdaten aus dem monatlichen Datensatz von Jones berechnet (Jones & Briffa, 1992; Briffa & Jones, 1993).

Zur Herleitung monatlicher Klimaszenarien verwendeten wir zwei globale 2xCO₂ Simulationen mit dem voll gekoppelten, atmosphärisch-ozeanischen ECHAM1/LSG-GCM des MPI Hamburg und dem an einem einfachen Zweischichten-Ozeanmodell angekoppelten atmosphärischen GCMII des Canadian Climate Centre (CCC). Die Simulationen sind in Cubasch *et al.* (1992), bzw. McFarlane *et al.* (1992) und Boer *et al.* (1992) dokumentiert. Beim ECHAM-GCM benutzten wir monatliche Anomaliefelder des Luftdrucks und der Temperatur aus den letzten 20 Jahren einer 100-jährigen Simulation unter 720 ppmv relativ zu den langjährig mittleren Feldern aus 40 Simulationsjahren unter 344

ppmv (*heutiges Klima*). Beim CCC-GCM wurde die Anomaliefelder aufgrund von je 5 Simulationsjahren unter 660 bzw. 330 ppmv berechnet.

Regionale Daten

Alle verwendeten regionalen Wetter- und Klimadaten wurden aus 10-minütigen Messungen an Stationen des automatischen Messnetzes (ANETZ), sowie aus bis zu 3 x täglichen Messungen an Stationen des klimatologischen Messnetzes (KLIMNETZ) der Schweizerischen Meteorologischen Anstalt (SMA) hergeleitet. Die Daten wurden aus der ENAD-Datenbank (Bantle, 1993), bzw. der KLIMA-Datenbank (Bantle, 1989) der SMA extrahiert.

Zur Auswahl der repräsentativen Standorte benutzten wir Temperatur- und Niederschlagsmessungen des Jahres 1993 an 84 (aus total 125) SMA-Klimastationen in einer Entfernung von bis zu 20 km von der Gebietsgrenze des Schweizerischen Mittellandes (Figur 82; für nähere Angaben zu den Klimastationen siehe Anhang A). Zur Herleitung der lokalen Wetterszenarien an den beiden ausgewählten Standorten Bern-Liebefeld und La Chaux-de-Fonds benutzten wir verschiedene Messungen aus den Jahren 1901-1994 (siehe unten).

An den ANETZ-Stationen werden alle benötigten meteorologischen Grössen (Niederschlag, Globalstrahlung, Temperatur, Dampfdruck und Windgeschwindigkeit) direkt gemessen. Allerdings reichen die längsten Messreihen nur bis 1978 zurück. Vorabklärungen zeigten zudem, dass Messreihen aus der Anlaufphase des Netzes etliche fehlende Werte oder Inhomogenitäten aufwiesen, so dass keine Messungen vor 1981 benutzt wurden. Die KLIMNETZ-Daten beginnen zwar an einigen Standorten bereits im Jahr 1901, aber leider waren nicht alle benötigten Variablen vorhanden. Um die fehlenden Variablen herleiten zu können, wurden zur Auswahl repräsentativer Standorte letztlich nur Stationen berücksichtigt, an welchen ANETZ- und KLIMNETZ-Messungen mindestens für die Dauer eines Jahres gleichzeitig vorlagen. Aufgrund verschiedener Aufstellungen der Messgeräte und unterschiedlicher Methoden zur Berechnung täglicher Wettervariablen wichen jedoch die am gleichen Standort parallel gemessenen Variablen teilweise systematisch voneinander ab. Deswegen wurde eine einfache Homogenisierungsprozedur angewendet, die weiter unten kurz erläutert wird.

Die ANETZ-Messungen wurden wie folgt aufbereitet: Zuerst wurden gemäss Bantle (1993) die benötigten stündlichen Wettervariablen aus den 10-minütigen Messungen berechnet. Da die ANETZ-Daten von der SMA nicht qualitätskontrolliert werden, wurde die Plausibilität der Stundenwerte mittels einer automatischen Prozedur (Kontrolle der Wertebereiche der einzelnen Variablen, sowie Ermittlung grosser Sprünge zwischen benachbarten Stunden) überprüft. Zudem wurden die langjährigen Verteilungen stündlicher und täglicher

ANETZ-Daten, sowie die Zeitreihen monatlicher Korrelationskoeffizienten zwischen täglichen ANETZ- und KLIMNETZ-Variablen visuell überprüft. Fehlende, sowie in einigen (wenigen) Fällen vermutlich fehlerhafte Stundenwerte wurden aus den benachbarten Stunden linear interpoliert.

Die Aufbereitung der KLIMNETZ-Daten bestand aus den folgenden Schritten:

(1) *Bereitstellung der täglichen Messungen:* An KLIMNETZ-Stationen liegen für verschiedene Wettervariablen bis zu drei Messungen oder Beobachtungen pro Tag vor. Die folgenden Messungen wurden verwendet: die täglichen Niederschlagssummen, die täglichen absoluten Sonnenscheindauern, die täglichen Temperaturextrema, die drei täglichen Messungen der Temperatur und der relativen Luftfeuchtigkeit, sowie die drei täglichen Beobachtungen der Windstärke vor 1970, bzw. Messungen der Windgeschwindigkeit ab 1970.

(2) *Berechnung fehlender täglicher Variablen:* Tägliche Mittelwerte der Globalstrahlung wurden für die gesamte Messdauer eines KLIMNETZ-Standortes aus Tageswerten der relativen Sonnenscheindauer, d.h. des Verhältnisses der täglichen absoluten zur astronomisch maximal möglichen Sonnenscheindauer, geschätzt. Hierzu benutzten wir die von Prescott vorgeschlagene Variante der *Ångstrom-Korrelation* (siehe z.B. Jain & Jain, 1988) mit einer täglichen Auflösung. Die Regressionsparameter wurden separat für jeden Kalendermonat und Standort anhand gleichzeitiger ANETZ- und KLIMNETZ-Messungen der Globalstrahlung und der Sonnenscheindauer über ein bis mehrere Jahre (siehe unten) ermittelt. Tagesmittel der Temperatur und der relativen Luftfeuchtigkeit wurden aus den drei täglichen Messungen gemäss Bantle (1989) berechnet. Das Tagesmittel des Dampfdrucks wurde aus diesen zwei Werten mittels der von Weischet (1991, p. 150) angegebenen Formel für die Abhängigkeit des Sättigungsdampfdrucks von der Temperatur berechnet. Die selbe Formel wurde auch angewendet, um den Dampfdruck zu den drei täglichen Ablesezeitpunkten zu bestimmen. Tagesextrema des Dampfdrucks, sowie Tagesmittel und -extrema der Windgeschwindigkeit wurden schliesslich aus den drei täglichen Werten durch einfache Extremwerts- bzw. Mittelwertbildung geschätzt. Die Beaufort-Angaben zur Windstärke (vor 1970) wurden hierbei durch die Zentralwerte fixer Geschwindigkeitsklassen ersetzt.

(3) *Homogenisierung:* Um die Konsistenz der wie oben geschildert hergeleiteten täglichen Variablen mit den ANETZ-Messungen zu verbessern gingen wir wie folgt vor: zuerst wurde basierend auf Daten für ein bis mehrere Jahre (siehe unten) eine univariate Regression zwischen jeder KLIMNETZ-Variablen und der entsprechenden täglichen ANETZ-Variablen ermittelt. Für die Temperaturvariablen wurden einfache lineare Regressionen, für die täglichen Nieder-

schlagssummen, sowie die Tagesmittel- und -extrema des Dampfdrucks und der Windgeschwindigkeit Regressionen zwischen Quadratwurzeltransformierten Variablen verwendet. Die Regressionsparameter wurden für jeden Standort und Monat separat ermittelt. Die Regressionen wurden schliesslich auf alle vorhandenen KLIMNETZ-Daten angewendet.

Die Homogenisierung wurde für Bern-Liebefeld basierend auf Messungen aus den Jahren 1981-1985 durchgeführt. Für La Chaux-de-Fonds konnten wegen mangelnder KLIMNETZ-Messungen nur die Daten des Jahres 1981 benutzt werden, was sich für die Homogenisierung der Windgeschwindigkeiten als unzureichend herausstellte. Die monatlichen Klimaszenarien für den Wind mussten deswegen aus Bern-Liebefeld interpoliert werden (siehe unten).

9.2.3 Auswahl repräsentativer Klimastationen

Die Auswahl der repräsentativen Klimastationen stützte sich auf den Vergleich der an den zwei experimentellen REGÖK-Standorten Ostermundigen (548 m ü.M.) und Oberbütschel (915 m ü.M.) gemessenen monatlichen Niederschlags-summen und monatsmittleren Temperaturen mit entsprechenden Messungen aus allen KLIMNETZ- und ANETZ-Stationen (Fig. 82), an welchen für das Jahr 1993 Daten vorlagen. Der Vergleich erstreckte sich über die Monate April bis Oktober 1993.

Die monatlichen Daten für die zwei REGÖK-Standorte wurden aus den mikrometeorologischen Messungen berechnet (siehe Kap. 5.3). Bei den ANETZ-Stationen wurden die Monatswerte aus Aufwandsgründen aus nicht qualitätskontrollierten Stundenwerten berechnet. Die Monatswerte an den KLIMNETZ-Stationen wurden wie im vorigen Abschnitt beschrieben berechnet. Auf eine Homogenisierung mit eventuell gleichzeitigen vorliegenden ANETZ-Messungen wurde explizit verzichtet, um einen Anhaltspunkt über die Auswirkungen lokaler Messvariabilität / Messungenauigkeiten auf die Auswahl der Klimastationen zu erhalten.

Die Ähnlichkeit der Witterung eines Standorts X (Ostermundigen oder Oberbütschel) mit derjenigen eines Standorts Y (eine der SMA-Klimastationen) wurde mittels des folgenden Ähnlichkeits-Index (similarity index, SI) gemessen:

$$SI_{X-Y} = 1 - (1/N_v) \cdot \sum_{i=1}^{N_v} \left\{ |V_{ix} - V_{iy}| / s_i \right\}$$

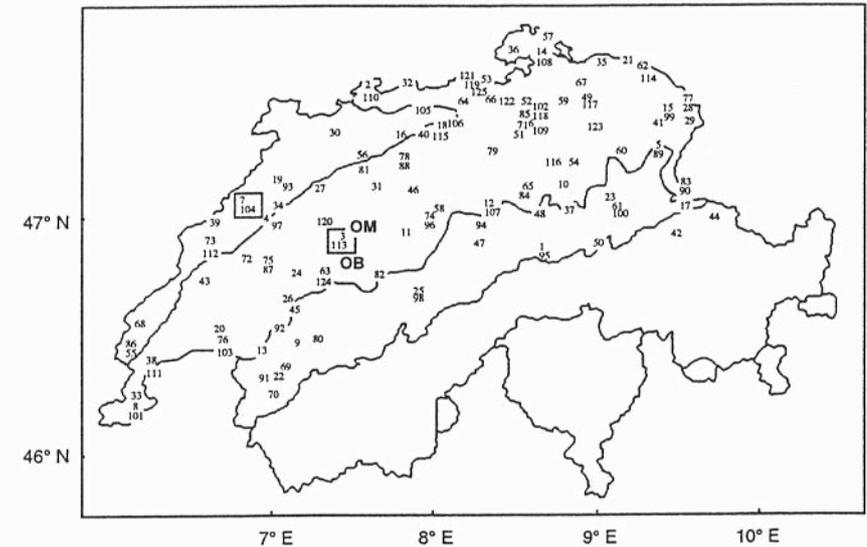


Fig. 82: Standorte von Klimastationen der Schweizerischen Meteorologischen Anstalt in einer Entfernung von bis zu 20 km von der Gebietsgrenze des Schweizerischen Mittellandes (Regionsgrenzen dick), die bei der Auswahl repräsentativer Standorte für die Herleitung von Klima- und Wetterszenarien berücksichtigt wurden.

OM, OB: experimentelle REGÖK-Standorte Ostermundigen (548 m ü.M.) und Oberbütschel (915 m ü.M.). Quadrate: ausgewählte Klimastationen mit für die REGÖK-Standorte näherungsweise repräsentativen Klimata (Nr. 3, 113: Bern-Liebefeld; Nr. 7, 104: La Chaux-de-Fonds; siehe auch Resultate). 1-85: Stationen des Schweizerischen Klima-Messnetzes (bis zu drei Messungen täglich, Daten teilweise ab 1901 verfügbar). 86-125: Stationen des automatischen Messnetzes (10-minütige Messungen, Daten frühestens ab 1978 verfügbar). Für nähere Angaben zu den Stationen siehe Anhang A.

V_{ix} and V_{iy} sind hierbei die simultanen Messungen der monatlichen Wettervariablen i an den Standorten X und Y, s_i die langjährige Standardabweichung des Gebietsmittels der Variablen i , und n_v die Anzahl der insgesamt verwendeten Variablen. Werte von SI nahe bei eins weisen auf eine grosse Ähnlichkeit der Werte aller Wettervariablen V_i an den Standorten X und Y hin, während SI-Werte nahe bei Null darauf hinweisen, dass die Messungen an den zwei Standorten im Mittel um eine Standardabweichung der gebietsmittleren Jahr-zu-Jahr Variabilität auseinanderliegen. Bei noch grösseren Unterschieden zwi-

schen den zwei Standorten nimmt der Index zunehmend negativere Werte an. Aufgrund der Gewichte s_i fallen hierbei räumliche Abweichungen umso stärker ins Gewicht, je kleiner die Jahr-zu-Jahr Variabilität des entsprechenden Gebietsmittels ist.

Die Variablen V_i waren durch die monatlichen Temperaturen ($i=1...7$) und Niederschlagssummen ($i=8...14$) für die Monate April 1993 – Oktober 1993 gegeben. Um den relativen Einfluss der Temperatur bzw. des Niederschlags bei der Stationswahl zu quantifizieren wurden auch SI-Werte nur aufgrund der jeweiligen sieben Variablen berechnet. Die Gewichte s_i wurden aus monatlichen Messungen an 20 über das gesamte Mittelland verteilten KLIMNETZ-Stationen für die Periode 1961-1990 berechnet.

Die Resultate wurden nach absteigenden SI-Werten tabelliert und unter Berücksichtigung der Datenverfügbarkeit wurden anschliessend Klimastationen mit möglichst hohen Werten ausgewählt. Um die Repräsentativität der ausgewählten Klimastationen zu überprüfen wurde das REGÖK-Simulationsmodell für die Jahre 1993 und 1994 mit den dort gemessenen stündlichen Wetterdaten angetrieben und die Resultate mit den an den REGÖK-Standorten simulierten Werten verglichen.

9.2.4 Herleitung monatlicher Szenarien

Die Herleitung der monatlichen Klimaszenarien (*Schritt 1* in der Beschreibung der Gesamtmethodik) erfolgte anhand der Regionalisierungsprozedur von Gyalistras *et al.* (1994). Die Anwendung dieser Prozedur besteht aus zwei Schritten: zuerst wird mittels einer Hauptkomponenten- und einer darauffolgenden kanonischen Korrelationsanalyse (z.B. Barnett & Preisendorfer, 1987) aus gleichzeitigen Messungen des grossräumigen atmosphärischen Zustandes und der lokalen Wettervariablen ein multivariates, lineares Regressionsmodell zur Vorhersage der lokalen Variablen ermittelt. In einem zweiten Schritt wird dieses Modell auf die durch die GCM-Simulationen vorgegebenen grossräumigen Klimaänderungen angewendet.

Der statistische Zusammenhang zwischen dem Global- und dem Regionalklima wurde separat für jeden Kalendermonat und jeden der beiden Standorte Bern-Liebefeld und La Chaux-de-Fonds basierend auf Messungen aus der Periode 1901-1980 ermittelt. Der grossräumige atmosphärische Zustand wurde durch monatliche Anomaliefelder des bodennahen Luftdrucks und der Temperatur beschrieben (siehe Abschnitt über Daten). Das monatliche Wetter der Periode 1901-1980 wurde an den beiden Klimastationen durch die folgenden 22 Variablen beschrieben: die monatliche Niederschlagswahrscheinlichkeit und -summe, das Monatsmittel und die innermonatliche Standardabweichung des Tagesmittels der Globalstrahlung, sowie die Monatsmittel und die innermonatli-

chen Standardabweichungen der Tagesmittel und -extrema der Temperatur, des Dampfdrucks und der Windgeschwindigkeit. Die monatlichen Variablen wurden aus täglichen KLIMNETZ-Daten berechnet, die wie oben geschildert hergeleitet und homogenisiert wurden.

Die Regionalisierungsprozedur wurde anschliessend auf zwei GCM-Simulationen, welche von einer schrittartigen Erhöhung des CO₂-Gehaltes auf ca. das Doppelte des heutigen Wertes mit nachfolgender Stabilisierung auf dem neuen Niveau ausgingen, angewendet (siehe Abschnitt über Daten). Die resultierenden Veränderungen der Erwartungswerte der monatlichen Wettervariablen zeigten recht unetwiegliche Jahresverläufe. Um die Jahresverläufe zu glätten bildeten wir gleitende Mittelwerte, wobei die Veränderungen eines bestimmten Monats mit dem Gewicht 1, diejenigen der beiden Nachbarmonate mit Gewichten von je 1/4 eingingen. Mögliche Veränderungen der Erwartungswerte der sechs monatlichen Windgeschwindigkeits-Variablen in La Chaux-de-Fonds wurden aufgrund der in Bern-Liebefeld erhaltenen Veränderungen geschätzt. Da die monatlichen Windvariablen an den beiden Standorten gut korrelierten wurden hierzu einfache lineare Regressionen verwendet. Diese wurden separat für jede der sechs Variablen und jeden Kalendermonat aufgrund monatlicher ANETZ-Daten für die Periode 1981-1994 ermittelt.

Zur Konstruktion der monatlichen Wetterverläufe unter den Szenario-Klimata (*Schritt 2*) verwendeten wir die Zeitreihen der Jahre 1981-1994, die für alle 22 monatlichen Wettervariablen direkt aus den jeweiligen ANETZ-Messungen hergeleitet wurden. Jedem Element einer Zeitreihe wurde die im jeweiligen Klimaszenario vorgegebene, monats- und variablen-spezifische Veränderung des jeweiligen Erwartungswertes hinzuaddiert. Die Jahr-zu-Jahr Variabilität aller 22 Variablen wurde unverändert belassen. Die Prozedur ergab in einigen wenigen Fällen inkonsistente Werte (z.B. negative Niederschlagssummen), die auf den jeweiligen Randwert (z.B. null) des Wertebereichs der Variablen gesetzt wurden.

9.2.5 Der stündliche Wettergenerator *WeathGen*

Der Übergang vom monatlichen zum stündlichen Wetter (*Schritt 3*) wurde mittels des stochastischen Wettergenerators *WeathGen* (Version 2.4a) vollzogen. *WeathGen* steht in Form eines allgemein verwendbaren Programms auf SUN-Workstations und Macintosh-PCs zur Verfügung. In diesem Abschnitt erläutern wir nur das Grundprinzip des Wettergenerators. Eine vollständige Beschreibung der mathematischen Gleichungen, sowie der zur Parameterschätzung verwendeten Verfahren sind in Gyalistras & Fischlin (1996a) zu finden.

Fig. 83 gibt einen Überblick über die Funktionsweise von *WeathGen*. *WeathGen* wird durch die oben erwähnten 22 monatlichen Wettervariablen (Vektor $\underline{X}_{(m)}$) angetrieben und erzeugt daraus unter Zuhilfenahme einer Reihe standortspezifischer Parameter in zwei Stufen zuerst 11 tägliche (Vektor $\underline{Y}_{(d)}$) und daraus schliesslich die benötigten 5 stündlichen (Vektor $\underline{Z}_{(h)}$) Wettervariablen. Alle in *WeathGen* vorkommenden Variablen sind in Tabelle 37 aufgeführt. Die wichtigsten allgemeinen, sowie alle standortsspezifischen Parameter sind in Tabelle 38 zu finden. *WeathGen* benötigt auch einige weniger wichtige, standortsunabhängige Parameter, welche im Anhang B aufgelistet sind.

Die stochastische Simulation der täglichen Wettersequenzen beruht auf die Grundidee von Richardson (1981): die zeitliche Dynamik des Niederschlags wird durch ein einfaches Markovketten-Modell erster Ordnung (d.h. mit einem Gedächtnis von 1 Tag, Zustandsvariable $Q_{(d)}$, siehe Fig. 83 unten) und zwei Zuständen (ein Tag ist entweder *trocken* oder *feucht*) beschrieben. Falls ein feuchter Tag auftritt wird für die zugehörige Niederschlagssumme eine Realisierung aus einer exponentialverteilten Zufallsvariablen gezogen. Die Dynamik aller anderen täglichen Variablen wird durch einen multivariaten, autoregressiven Prozess erster Ordnung (Zustandsvektor $\underline{S}_{(d)}$, Wertebereich kontinuierlich) beschrieben. Dieser Prozess wird durch einen Vektor normalverteilter und gegenseitig unabhängiger Zufallsvariablen angetrieben und produziert auto- und kreuzkorrelierte Zeitreihen. Tägliche Werte der Wettervariablen werden erhalten, indem der tägliche Zustand je nach Auftreten eines trockenen oder feuchten Tages mit unterschiedlichen Erwartungswerten und Standardabweichungen destandardisiert wird.

Im Vergleich zu bestehenden täglichen Wettergeneratoren weist *WeathGen* einige Besonderheiten auf: Nach dem bisher üblichen Ansatz variieren die Parameter der oben geschilderten stochastischen Prozesse zwar mit der Jahreszeit, werden aber ansonsten als konstant angenommen. Im Gegensatz dazu werden in *WeathGen* die wichtigsten Parameter in Funktion der 22 Eingangsvariablen bestimmt: so hängen die Übergangswahrscheinlichkeiten zwischen trockenen und feuchten Tagen von der monatlichen Niederschlagswahrscheinlichkeit ab (vgl. Geng *et al.*, 1986), und die Varianz der Exponentialverteilung des Niederschlags ist eine Funktion der monatlichen Niederschlagssumme (vgl. Wilks, 1989a), während die zur Destandardisierung der restlichen Wettervariablen benötigten Erwartungswerte und Standardabweichungen für trockene und feuchte Tage aufgrund der jeweiligen monatlichen Mittelwerte und Standardabweichungen vorhergesagt werden (Fig. 83, unten).

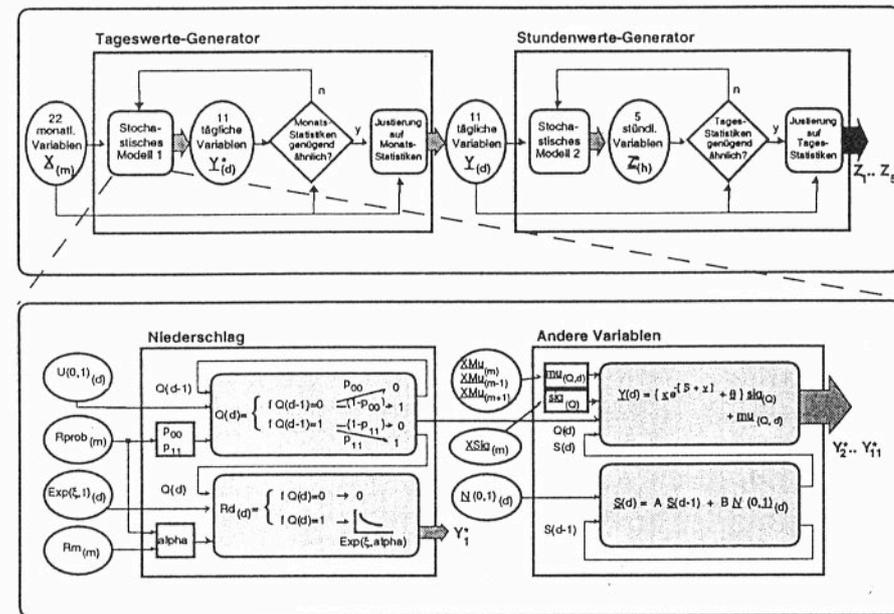


Fig. 83: Überblicksschema des Wettergenerators *WeathGen*.

Oben: Gesamtablauf bei der Generierung von Stundenwerten für einen bestimmten Monat. \underline{X} , \underline{Y} , \underline{Z} : Vektoren monatlicher, täglicher und stündlicher Wettervariablen; m – Monat; d – Tag; h – Stunde.

Unten: Detaillansicht des Teilmodells zur Generierung von Werten für die täglichen Wettervariablen. Pfeile: Informations- bzw. Datenfluss; Ovale: Eingangsvariablen; weisse Rechtecke: Berechnung monatlicher oder täglicher Hilfsvariablen; graue Rechtecke: Berechnung von Zustands- oder Ausgangsvariablen; Unterstrichene Bezeichner: Vektoren. Für weitere Erklärungen siehe Text, für die Variablen- und Parameterbezeichner siehe Tabellen 37 und 38.

Die Vorhersagen beruhen auf empirische Regressionen, deren Parameter unter bestimmten Nebenbedingungen für die gegenseitige Konsistenz der vorhergesagten Grössen mit den monatlichen Vorgaben als auch untereinander, bestimmt werden (z.B. sind die Erwartungswerte der nassen und trockenen Tage über die monatliche Niederschlagswahrscheinlichkeit mit dem monatlichen Erwartungswert verknüpft; siehe Katz, 1996; Gyalistras & Fischlin, 1996a).

Tabelle 37

Übersicht der Variablen des Wettergenerators *WeathGen*.

#: Dimension eines Vektors oder totale Anzahl Variablen; unter-strichene Bezeichner: Vektoren; R-Niederschlag; S- Globalstrahlung; T-Temperatur; V-Dampfdruck; W- Windgeschwindigkeit; m - Monat; d-Tag; h-Stunde.

Bezeichner	#	Beschreibung	Einheit(en)
Generierung von Tageswerten			
<i>Eingangsvariablen (erste 4 Einträge = Vektor X)</i>			
RProb	1	Monatliche Niederschlagswahrscheinlichkeit	-
Rm	1	Monatliche Niederschlagssumme	mm
<u>XMu</u>	10	Monatsmittel von Sd, Td, Tmin, Tmax, Vd, Vmin, Vmax, Wd, Wmin, Wmax	W m ⁻² , °C, kPa, m s ⁻¹
<u>XSig</u>	10	Standardabweichungen von Sd, Td, Tmin, Tmax, Vd, Vmin, Vmax, Wd, Wmin, Wmax innerhalb des Monats	W m ⁻² , °C, kPa, m s ⁻¹
U(0,1)	1	Tägliche, uniform verteilte Zufallsvariable im Intervall [0..1]	-
Exp(x,1)	1	Tägliche, exponentiell verteilte Zufallsvariable mit unterem Schwellwert x (siehe Tab. 38) und Standardabweichung = 1	-
<u>N(0,1)</u>	10	Tägliche, normalverteilte und unabhängige Zufallsvariablen mit Mittelwerten = 0 und Standardabweichungen = 1	(versch.)
<i>Ausgangsvariablen (Vektor Y)</i>			
Rd	1	Tägliche Niederschlagssumme	mm
Sd	1	Tagesmittel von S	W m ⁻²
Td, Tmin, Tmax	3	Tagesmittel, -minimum und maximum von T	°C
Vd, Vmin, Vmax	3	Tagesmittel, -minimum und maximum von V	kPa
Wd, Wmin, Wmax	3	Tagesmittel, -minimum und maximum von W	m s ⁻¹
<i>Zustandsvariablen</i>			
Q	1	Zustandsvariable für Rd (0=Tag ohne, 1=Tag mit Niederschlag)	-
<u>S</u>	10	Zustandsvektor für auf Mittelwert 0 und Varianz 1 normierte, wahlweise Log-Normaltransformierte Variablen Sd, Td, Tmin, Tmax, Vd, Vmin, Vmax, Wd, Wmin, Wmax	(versch.)
<i>Hilfsvariablen</i>			
p00, p11	2	Monatliche Wahrscheinlichkeiten, dass auf einen trockenen (index 0) bzw. nassen (index 1) Tag ein weiterer trockener bzw. nasser Tag folgt; Berechnung: f(RProb)	-
alpha	1	Monatlicher Parameter der Exponentialverteilung für Rd an Tagen mit Niederschlag; Berechnung: f(RProb, Rm)	1/mm
<u>mu0, mu1</u>	20	Tägliche Erwartungswerte von Sd, Td/min/max, Vd/min/max, Wd/min/max an trockenen (0) und nassen (1) Tagen; Berechnung: f(XMu(m), XMu(m-1), XMu(m+1))	(versch.)
<u>sig0, sig1</u>	20	Monatliche Standardabweichungen von Sd, Td/min/max, Vd/min/max, Wd/min/max an trockenen (0) und nassen (1) Tagen; Berechnung: f(XSig(m))	(versch.)
Generierung von Stundenwerten			
<i>Eingangsvariablen</i>			
<u>Y</u>	11	Tägliche Variablen, s.o.	(versch.)
Uh(0,1)	1	Stündliche, uniform verteilte Zufallsvariable im Intervall [0..1]	-
ExpH(z,1)	1	Stündliche, exponentiell verteilte Zufallsvariable mit unterem Schwellwert z (siehe Tabelle 38) und Standardabweichung = 1	-
<u>Nh(0,1)</u>	4	Stündliche, normalverteilte und unabhängige Zufallsvariablen mit Mittelwerten = 0 und Standardabweichungen = 1	(versch.)

Tabelle 37, Fortsetzung

<i>Ausgangsvariablen (Vektor Z)</i>			
Rh	1	Stündliche Niederschlagssumme	mm
Sh, Th, Vh, Wh	4	Stundenmittel von S, T, V und W	W m ⁻² , °C, kPa, m s ⁻¹
<i>Zustandsvariablen</i>			
Qh	1	Zustandsvariable für Rh (0=Stunde ohne, 1=Stunde mit Niederschlag)	-
<u>Sh</u>	4	Zustandsvektor für auf Mittelwert 0 und Varianz 1 normierte Variablen Sh, Th, Vh und Wh	(versch.)
<i>Hilfsvariablen</i>			
kHS, muHS	2	Tägliche Parameter des Tagesverlaufs der Erwartungswerte des stündlichen Clearness-Index Sh/Smax; Berechnung: f(Sd)	-
<u>amplOrTau1, amplOrTau2, muh1, muh2</u>	12	Tägliche Amplituden (ampl) oder Zeitkonstanten (tau) und Mittelwerte (mu) des steigenden (1), bzw. fallenden (2) Astes der Tagesverläufe der Erwartungswerte von T, V, und W; Berechnung: f(*min, *max) oder f(*d), wobei * = T, V, oder W	(versch.)
ShE, ThE, VhE, WhE	4	Stündliche Verläufe der Erwartungswerte von Sh, Th, Vh und Wh	W m ⁻² , °C, kPa, m s ⁻¹

Ein zweiter wichtiger Unterschied ist, dass sich bei den bisher üblichen Wettergeneratoren die monatliche (oder saisonale) Jahr-zu-Jahr Variabilität des Wetters implizit aus der Variabilität der simulierten täglichen Zeitreihen ergibt. Bei *WeathGen* wird hingegen die Jahr-zu-Jahr Variabilität anhand der 22 monatlichen Eingangsvariablen explizit vorgegeben. Dies wird wie folgt erreicht (Fig. 83, oben links): (a) die verschiedenen Parameter der täglichen stochastischen Prozesse werden für jeden Monat wie oben geschildert aus den jeweiligen monatlichen Vorgaben ermittelt; (b) es werden so lange monatliche Zeitreihen des Tagesvektors $\underline{Y}(d)$ generiert, bis eine genügend *prozess-typische* Realisierung auftritt; hierzu müssen die Monatsstatistiken mehrerer wichtiger Variablen (wie z.B. die Anzahl Niederschlagstage oder die monatsmittlere Temperatur) mit einer vorgegebenen Toleranz (z.B. ± 1 Tag oder ± 0.1 °C, siehe Anhang B) genügend nahe an die Prozess-Erwartungswerte, bzw. die jeweiligen monatlichen Vorgaben, zu liegen kommen; (c) schliesslich werden die täglichen Zeitreihen einer akzeptierten monatlichen Realisierung durch Verschiebung und/oder Umskalierung exakt auf die vorgegebenen Monatwerte justiert.

Die Simulation stündlicher Wettersequenzen folgt weitgehend dem für die täglichen Wettervariablen geschilderten Vorgehen (Fig. 83, oben). Die wichtigsten Unterschiede sind, dass die Übergangswahrscheinlichkeiten des stündlichen Markovkettenmodelles für den Niederschlag nur vom Kalendermonat abhängen, und dass für die restlichen stündlichen Variablen ein zyklstationärer Prozess (siehe z.B. Hasselmann & Barnett, 1981; Gardner, 1994) anstatt eines einfachen autoregressiven Prozesses verwendet wird. Die Erwartungswerte der Tageszyklen der stündlichen Variablen werden hierbei aus den jeweiligen tägli-

chen Variablen mittels empirischer Regressionen vorausgesagt (Gyalistras & Fischlin, 1996a; s.a. Tabelle 38).

Alle standortspezifischen Parameter von *WeathGen* (Tabelle 38) wurden aufgrund von ANETZ-Daten für 1981-85 bestimmt. Der Wettergenerator wurde validiert indem er für die Periode 1981-1994 mit aus ANETZ-Messungen hergeleiteten monatlichen Zeitreihen der 22 Eingangsvariablen angetrieben wurde. Die langjährigen Statistiken der simulierten und der gemessenen stündlichen und täglichen Wettervariablen wurden für die unabhängige Periode 1986-1994 mittels der folgenden Fehlermasse miteinander verglichen: mittlerer Fehler MF = $\sum(x_i - x_{is})/n$, mittlerer absoluter Fehler MAF = $\sum|x_i - x_{is}|/n$, mittlerer relativer Fehler MRF = $\sum[100 \cdot (x_i - x_{is})/x_i]/n$, Mittel der Absolutwerte der relativen Fehler MARF = $\sum[100 \cdot |x_i - x_{is}|/x_i]/n$. Hierbei war n die Anzahl der verfügbarer Wertepaare (z.B. n=12 für alle Monate des Jahres), x_i entsprach der i-ten gemessenen und x_{is} der i-ten simulierten langjährigen Statistik.

In einem zweiten Schritt wurde das REGÖK-Simulationsmodell mit stochastisch simulierten Wetterdaten angetrieben. Hierzu wurden für jedes Jahr der Periode 1981-1994 drei tägliche und daraus je drei stündliche Wetterverläufe erzeugt und die vom REGÖK-Modell simulierten Jahreserträge und Summen der Evapotranspiration in der Vegetationsperiode mit jenen, die anhand der stündlichen ANETZ-Daten erhalten wurden, verglichen.

Tabelle 38

Übersicht der wichtigsten allgemeinen, sowie der standortspezifischen Parameter des Wettergenerators *WeathGen*.

Wo angegeben gelten die Beispielwerte für den Standort Bern. #: Dimension eines Vektors oder totale Anzahl Parameter; unterstrichene Bezeichner: Vektoren; GMT– Greenwich Mean Time (12.00: Sonne auf dem Höchststand); R– Niederschlag; S–Globalstrahlung; T–Temperatur; V–Dampfdruck; W–Windgeschwindigkeit. Für Variablenbezeichner siehe Tabelle 37. Für alle weiteren, standortsunabhängigen Parameter siehe Anhang B.

Bezeichner	#	Beschreibung	Einheit/Wert
Allgemeine Parameter			
solConst	1	Solarkonstante	W m ⁻² /1370.0
latitude	1	Geographische Breite	°N/46.8
tpDMeasStart	1	Startzeitpunkt der täglichen Niederschlagsmessungen	GMT /6.00
x	1	Schwellwert für Tag mit Niederschlag	mm/0.1
z	1	Schwellwert für Stunde mit Niederschlag	mm/0.01
i1, i2, i3	3	Initialwerte für den Pseudozufallszahlen-Generator	–
Generierung von Tageswerten			
<i>Systemdynamik</i>			
A	100	Systemmatrix (10x10)	(versch.)
B	100	Eingangsmatrix (10x10)	(versch.)
<i>Berechnung der Hilfsvariablen</i>			
p00A, p00B, p11A, p11B	4	Achsenabschnitte (A) und Steigungen (B) zur Berechnung von p00, p11	(versch.)
m0A, m0B, m1A, m1B	40	–"– mu0, mu1	(versch.)
s0A, s0B, s1A, s1B	40	–"– sig0, sig1	(versch.)
<i>Berechnung der Ausgangsvariablen / Transformation für Log-Normalverteilung</i>			
k	10	Schiefenindex (0 = keine Transformation, +1= rechts-, -1 = linksschief)	(versch.)
q	(10)	Unterer Schwellwert für Log-Normalverteilung (nur falls k_0)	(versch.)
n	(10)	Erwartungswert-Vektor des System-Ausgangsvektors (Einzelelemente n _i =0, falls k _i =0)	(versch.)
Generierung von Stundenwerten			
<i>Systemdynamik</i>			
p00h, p11h	2	Wahrscheinlichk., dass auf eine trockene (index 0) bzw. nasse (index 1) Stunde eine weitere trockene bzw. nasse Stunde folgt	h h ⁻¹
Ah(1),... Ah(24)	384	Systemmatrizen (24 mit je 4x4 Elementen)	(versch.)
Bh(1),... Bh(24)	384	Eingangsmatrizen (24 mit je 4x4 Elementen)	(versch.)

Tabelle 38, Fortsetzung

Berechnung der Hilfsvariablen			
kappa	1	Zeitkonstante für Berechnung des Tagesverlaufs der Erwartungswerte des stündlichen Clearness-Index Sh/Smax	–
kHSA, kHSB, muHSA, muHSB dCycType	4 3	Achsenabschnitte (*A) und Steigungen (*B) zur Berechnung von kHS und muHS Monatlicher Typ des Tagesverlaufs der stündlichen Erwartungswerte von Th, Vh, Wh. 1="Sinus-Sinus", 2="Exponential-Exponential", 3"Exponential-Sinus"; 4="Sinus-Exponential"	(versch.) –
switchH1, switchH2	6	Umschaltzeitpunkte zwischen den steigenden und fallenden Ästen der Verläufe der stündl. Erwartungswerte von Th, Vh, und Wh	GMT
tpMin1, tpMax1, tpMin2, tpMax2, lambda1, lambda2	6 bis 12	Zeitpunkte des Minimums (tpMin) und -Maximums (tpMax) der Sin-Funktion, bzw. Zeitkonstanten (lambda) der Exp-Funktion für den steigenden (1) bzw. fallenden (2) Ast der stündl. Erwartungswerte von Th, Vh, Wh (2..4 Parameter pro Variable, je nach jew. dCycType)	(versch.)
ampITauMuA, ampITauMuB	24	Achsenabschnitte (*A) und Steigungen (*B) zur Berechnung der Hilfsvariablen ampIOrTau1, ampIOrTau2, muh1 und muh2	(versch.)
Berechnung der Ausgangsvariablen			
sh0(1).. sh0(24)	96	Standardabw. von Sh, Th, Vh, Wh an trockenen Stunden	W m ⁻² , °C, kPa, m s ⁻¹
sh1(1).. sh1(24)	96	Standardabw. von Sh, Th, Vh, Wh an nassen Stunden	W m ⁻² , °C, kPa, m s ⁻¹

9.3 Resultate

9.3.1 Repräsentative Klimastationen

Von den 125 ursprünglich ausgewählten Klimastationen (Fig. 82) standen insgesamt für nur 84 Stationen (51 KLIMNETZ- sowie 33 ANETZ-Stationen) Daten für das Jahr 1993 zur Verfügung (siehe Anhang B). Die jeweils 40 ersten Stationen, deren Witterungen die grössten Ähnlichkeiten mit den Witterungen der beiden experimentellen REGÖK-Standorte Ostermundigen und Oberbütschel aufwiesen sind in den Tabellen 39 bzw. 40 aufgeführt. Wie aus den beiden Tabellen zu ersehen ist, ergaben die Ähnlichkeitsindices (SI) für die Temperatur allein (jeweils mittlere Spalten in den beiden Tabellen) allgemein höhere Werte als für den Niederschlag (Spalten rechts). Für die Temperatur wurde erwartungsgemäss eine starke Abhängigkeit der SI-Werte von der Stationshöhe gefunden (im Schnitt Abnahme des SI um -0.43/100 m beim Vergleich von Ostermundigen oder Oberbütschel mit einer jeweils höhergelegenen Station). Allerdings zeigten die SI-Werte auch innerhalb ein und der selben Höhenlage eine beträchtliche Streubreite; so wurde z.B. für die 76 km von Ostermundigen entfernte Klimastation Unterboezberg (514 m.ü.M.) für die Temperatur ein SI-Wert von 0.53 erhalten (Tabelle 38 Mitte, entsprechend einer mitt-

leren Abweichung von +0.6 °C), während für das nur 42 km entfernte und ungefähr auf der gleichen Höhe (485 m.ü.M.) gelegene Neuchatel ein weit schlechterer Wert von -0.30 erhalten wurde (entsprechend einer mittleren Abweichung von +1.7 °C).

Für Ostermundigen ergab die nur 7 km entfernte ANETZ-Station Bern-Liebefeld von allen Stationen den höchsten Wert für den kombinierten, d.h. die monatlichen Temperaturen als auch die monatlichen Niederschläge berücksichtigenden, Ähnlichkeitsindex (SI = 0.73; Tabelle 39 links). Die mittlere Differenz zwischen den in Bern-Liebefeld und den in Ostermundigen gemessenen Monatsmitteln betrug nur ca. +0.3 °C für die Temperatur und +5% für den Niederschlag. Die in allernächster Nähe ebenfalls vorhandene KLIMNETZ-Station in Bern-Liebefeld ergab aufgrund einer mittleren Temperaturabweichung von +0.6 °C einen insgesamt etwas tieferen SI-Wert, während der Niederschlag eine ähnlich gute Übereinstimmung wie für die ANETZ-Station zeigte (Tabelle 39, Mitte und rechts). Aufgrund dieser guten Resultate, sowie der Verfügbarkeit langer Messreihen, wurde Bern-Liebefeld als die für Ostermundigen und für die tieferen Lagen des Mittellandes repräsentative Klimastation ausgewählt.

Für Oberbütschel (Tabelle 40) wurden etwas tiefere SI-Werte als für Ostermundigen erhalten. Das beste Resultat für den kombinierten Ähnlichkeitsindex wurde für das ca. 48 km entfernte Chateau-d'Oex erhalten (SI = 0.46; mittlere Abweichungen von -0.2 °C für die Temperatur und +30% für den Niederschlag). Die nächstgelegene Messstation auf der Höhenlage von ca. 900-1000 m.ü.M., das ca. 19 km entfernte Plaffeien-Oberschrot, ergab hingegen einen kombinierten SI-Wert von nur 0.10 (mittlere Abweichungen: -0.7 °C und +48%). Aufgrund fehlender stündlicher bzw. langjähriger Daten konnten jedoch weder Chateau-d'Oex noch Plaffeien-Oberschrot weiterverwendet werden.

Der nächste in Frage kommende Standort, an dem sowohl ANETZ- als auch langjährige KLIMNETZ-Messungen vorlagen, war St. Gallen in einer Entfernung von 162 km (SI = 0.16). Diese Station wurde jedoch aufgrund der relativ geringen Stationshöhe (780 m ü.M.), welche für die oberen Höhenlagen des Mittellandes nur beschränkt repräsentativ gewesen wäre, ebenfalls ausgeschlossen. Somit wurde letztlich das ca. 58 km von Oberbütschel entfernte La Chaux-de-Fonds auf einer Höhe von 1018 m ü.M. ausgewählt (SI = -0.11). Die mittleren Abweichungen von Oberbütschel betragen hier für die Temperatur -0.9 °C (SI = 0.21; Tabelle 40 Mitte) und für den Niederschlag +45% (SI = -0.44; in Tabelle 40 nicht aufgeführt).

Tabelle 39

Vergleich der Witterung des experimentellen REGÖK-Standortes Ostermundigen (548 m ü.M.) in der Periode April-Oktober 1993 mit den Witterungen ausgewählter Klimastationen innerhalb oder in der Nähe des Schweizerischen Mittellandes.

Ähnlichkeitsindices (SI) nahe bei 1 weisen auf grosse, negative Indices auf kleine Ähnlichkeiten der Witterungen hin. Die Stationsnummern (Nr) beziehen sich auf die in Fig. 82 und Anhang A aufgeführten Stationen. T&R: SI wurden aufgrund gleichzeitiger Berücksichtigung der monatsmittleren Temperaturen und der monatlichen Niederschlagssummen berechnet. T bzw. R: Berücksichtigung der Temperaturen bzw. der Niederschlagssummen allein. Punkte (*) kennzeichnen Stationen des automatischen Messnetzes (10-min Messungen verfügbar).

Rang	T und N		T		N							
	Nr	Name	m ü.M.	SI	Nr	Name						
1	113	* Bern-Liebefeld	565	0.73	24	Fribourg	634	0.85	3	Bern-Liebefeld	570	0.70
2	105	* Ruenenberg	610	0.70	98	* Interlaken	580	0.83	113	* Bern-Liebefeld	565	0.69
3	24	Fribourg	634	0.67	105	* Ruenenberg	610	0.78	105	* Ruenenberg	610	0.63
4	98	* Interlaken	580	0.64	113	* Bern-Liebefeld	565	0.76	64	Unterboezberg	514	0.62
5	3	Bern-Liebefeld	570	0.62	45	Broc Usine	680	0.73	56	Balmberg	1075	0.61
6	88	* Wynau	422	0.62	117	* Taenikon	536	0.71	78	Wynau	422	0.56
7	78	Wynau	422	0.57	46	Hurtwil	639	0.69	88	* Wynau	422	0.56
8	64	Unterboezberg	514	0.57	88	* Wynau	422	0.68	91	* Aigle	381	0.53
9	117	* Taenikon	536	0.56	11	Langnau i.E.	695	0.67	31	Gerschberg	482	0.52
10	49	Taenikon	536	0.51	60	Ebnat-Kappel	629	0.63	32	Rheinfelden	271	0.51
11	31	Oeschberg	482	0.48	49	Taenikon	536	0.60	24	Fribourg	634	0.50
12	45	Broc Usine	680	0.48	78	Wynau	422	0.59	27	Biel	434	0.50
13	46	Hurtwil	639	0.46	109	* Zuerich SMA	556	0.58	52	Zuerich Flughafen	431	0.46
14	87	* Payeme	490	0.45	3	Bern-Liebefeld	570	0.55	102	*Zuerich-Kloten	436	0.46
15	30	Delemont	416	0.43	118	* Reckenholz	443	0.54	98	* Interlaken	580	0.45
16	35	Haidenhaus	694	0.43	64	Unterboezberg	514	0.53	87	* Payeme	490	0.45
17	102	*Zuerich-Kloten	436	0.41	35	Haidenhaus	694	0.51	75	Payeme (Aerol.)	489	0.44
18	118	* Reckenholz	443	0.41	114	* Guertingen	440	0.51	49	Taenikon	536	0.42
19	75	Payeme (Aerol.)	489	0.39	6	Zuerich SMA	556	0.51	117	* Taenikon	536	0.42
20	41	Stein AR	786	0.37	28	Heiden	811	0.50	95	* Altdorf	449	0.40
21	109	* Zuerich SMA	556	0.36	15	St.Gallen	664	0.49	1	Altdorf	451	0.40
22	114	* Guertingen	440	0.36	30	Delemont	416	0.48	30	Delemont	416	0.39
23	52	Zuerich Flughafen	431	0.34	41	Stein AR	786	0.47	35	Haidenhaus	694	0.35
24	106	* Buchs-Suhr	387	0.33	61	Glarus	470	0.46	92	* Moleson	1972	0.34
25	6	Zuerich SMA	556	0.32	100	* Glarus	515	0.45	13	Montreux-Clarens	408	0.30
26	11	Langnau i.E.	695	0.32	87	* Payeme	490	0.45	85	Reckenholz	443	0.28
27	85	Reckenholz	443	0.30	31	Oeschberg	482	0.45	118	* Reckenholz	443	0.28
28	36	Hallau	450	0.27	99	* St.Gallen	779	0.45	9	Chateau-d'Oex	980	0.28
29	62	Guertingen	438	0.27	106	* Buchs-Suhr	387	0.43	93	* Chasseral	1599	0.28
30	15	St.Gallen	664	0.22	116	* Wädenswil	463	0.42	41	Stein AR	786	0.28
31	116	* Wädenswil	463	0.22	102	*Zuerich-Kloten	436	0.37	42	Vaetris	948	0.27
32	95	* Altdorf	449	0.21	75	Payeme (Aerol.)	489	0.34	110	*Basel-inningen	316	0.24
33	1	Altdorf	451	0.20	62	Guertingen	438	0.32	2	Basel Binningen	317	0.24
34	99	* St.Gallen	779	0.20	85	Reckenholz	443	0.31	106	* Buchs-Suhr	387	0.24
35	91	* Aigle	381	0.20	36	Hallau	450	0.31	45	Broc Usine	680	0.24
36	108	* Schaffhausen	437	0.19	108	* Schaffhausen	437	0.28	36	Hallau	450	0.24
37	51	Uetliberg	810	0.18	52	Zuerich Flughafen	431	0.22	51	Uetliberg	810	0.23
38	27	Biel	434	0.14	29	Alstetten SG	474	0.18	46	Hurtwil	639	0.23
39	32	Rheinfelden	271	0.12	51	Uetliberg	810	0.13	62	Guertingen	438	0.21
40	42	Vaetris	948	0.11	14	Schaffhausen	457	0.08	114	* Guertingen	440	0.21

Die Tests mit dem REGÖK-Simulationsmodell ergaben an den beiden ausgewählten Klimastationen die folgenden Resultate: Für Bern-Liebefeld wurde im Mittel über die Jahre 1993 und 1994 ein um 6.7% kleinerer Jahresertrag als für Ostermundigen simuliert. Die simulierten Summen der Evapotranspiration in der Vegetationsperiode waren hingegen im Schnitt um 5.8% höher. Die für La Chaux-de-Fonds simulierten Jahreserträge wichen im Mittel um -3.3% und die Evapotranspirations-Summen um -15.9% von den für Oberbütschel erhaltenen Werten ab.

9.3.2 Simulation des heutigen Wetters

Stündliches Wetter

In Fig. 84 werden die gemessenen langjährigen Verteilungen stündlicher Wettervariablen für Bern-Liebefeld im Juli mit den aus einer Simulation mit *WeathGen* erhaltenen Verteilungen verglichen. Die Simulation erstreckte sich über die Jahre 1981-1994 und wurde durch 22 monatliche Eingangsvariablen, die aus den stündlichen Messungen ermittelt worden waren, angetrieben.

Wie zu ersehen ist, wurden die langjährig mittleren Tageszyklen der verschiedenen Variablen vom Wettergenerator sehr gut reproduziert. Für die Temperatur wurden die langjährigen stündlichen Mittelwerte der Verifikationsperiode 1986-1994 im Mittel über alle Kalendermonate und alle Stunden des Tages mit einem mittleren Fehler (MF) von $-0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ und einem mittleren absoluten Fehler (MAF) von $0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ reproduziert. Für die Globalstrahlung, den Dampfdruck und die Windgeschwindigkeit wurden ebenfalls nur relativ kleine MF (MAF) von -0.7 W m^{-2} (8.4 W m^{-2}), -0.01 kPa (0.02 kPa), und 0.01 m s^{-1} (0.09 m s^{-1}) erhalten. Bei den 5%- und 95%-Perzentilen traten jedoch einige grössere Abweichungen auf. So betragen die MAF im Mittel über alle Kalendermonate und Stunden des Tages für die 5%- bzw. 95%-Perzentile der langjährigen monatlichen Verteilungen der Temperatur jeweils $0.8\text{ }^{\circ}\text{C}$. Bei der Globalstrahlung, bei welcher zu viele Stunden mit überdurchschnittlich hohen, aber zu wenig Stunden mit besonders tiefen Stundenmitteln simuliert wurden, betragen die MAF 8 W m^{-2} bzw. 22 W m^{-2} . Für den Dampfdruck wurden schliesslich MAF von 0.03 kPa bzw. 0.05 kPa und für die Windgeschwindigkeit von 0.1 m s^{-1} bzw. 0.8 m s^{-1} erhalten.

Fig. 85 vergleicht beispielhaft eine mit *WeathGen* erzeugte Realisierung des stündlichen Wetters für den Juli 1986 in Bern-Liebefeld (rechts) mit den tatsächlich gemessenen Zeitreihen (links). Die gemessenen und die simulierten Zeitreihen stimmten in den 22 monatlichen Wetterstatistiken, mit welchen der Wettergenerator angetrieben wurde, definitionsgemäss (siehe Figur 83) sehr gut überein. Zwischen den zwei Datensätzen traten allerdings einige qualitative wie quantitative Unterschiede auf, die nur teilweise zufallsbedingt waren.

So zeigt Fig. 85 (oben) beim simulierten Niederschlag eine in den Messungen nicht vorgefundene Häufung stündlicher Niederschlagsereignisse. Eine genauere Analyse ergab, dass der Wettergenerator zu viele feuchte Stunden simuliert: innerhalb der gesamten Verifikationsperiode (1986-1994) trat in 14.7% aller 78'840 simulierten Stunden Niederschlag auf, während der Anteil feuchter Stunden in den Messungen nur 12.5% betrug. Die häufigeren Niederschläge gingen dabei vor allem zu Gunsten der kleinsten Niederschlagsklasse (0.01 bis 0.05 mm). Die relative Häufigkeit von Ereignissen aus dieser Klasse betrug in der Simulation im Mittel über alle Kalendermonate 8.9%, in den Messungen hingegen nur 7.0%. Die Form der langjährigen monatlichen Verteilungen der stündlichen Niederschlagssummen wurde ansonsten qualitativ korrekt wiedergegeben (nicht gezeigt). Für die simulierte Anzahl feuchter Stunden betrug der mittlere relative Fehler (MRF) über alle Monate der Verifikationsperiode +28%, während das Mittel der Absolutwerte der relativen Fehler (MARF) 35% betrug. Entsprechend wurden im Mittel über alle Monate die mittleren Längen der Trockenperioden mit einem MRF (MARF) von -20% (24%) systematisch unter- und die Übergangswahrscheinlichkeiten von feuchten nach feuchten Stunden (p_{11h} , siehe Tabelle 38) mit einem MRF (MARF) von +0.3% (11%) systematisch überschätzt. Die Übergangswahrscheinlichkeiten zwischen trockenen Stunden (p_{00h}) wurden hingegen mit einem MRF (MARF) von nur -1.1% (1.4%) gut reproduziert.

Die simulierten Zeitreihen für die Temperatur, die Globalstrahlung, den Dampfdruck und die Windgeschwindigkeit zeigten insgesamt realistische Tagesverläufe (Fig. 85, rechts). Ähnlich wie bei den Messungen zeigten die vier Variablen unterschiedliche Verläufe in Abhängigkeit des Niederschlags. So gehen z.B. in Fig. 85 (rechts) feuchte Tage typischerweise mit relativ tiefen Temperaturen und kleinen täglichen Temperaturamplituden einher.

Allerdings wurden in der Simulation die Wechsel zwischen verschiedenen Wetterlagen insgesamt weniger ausgeprägt als in den Messungen dargestellt. So ist aus Fig. 85 (links) zu ersehen, dass die Niederschlagsereignisse mit Temperaturstürzen um 10-15 °C einhergehen können, während die simulierte Zeitreihe für die Temperatur (rechts) in dieser Hinsicht eine insgesamt kleinere Variabilität aufweist. Ein ähnlicher dämpfender Effekt ist auch bei den restlichen drei Variablen zu beobachten.

Die simulierten Zeitreihen wiesen schliesslich für alle Stunden des Tages insgesamt etwas zu niedrige stündliche Autokorrelations-Koeffizienten auf. Die ebenfalls tageszeitabhängigen Kreuzkorrelations-Koeffizienten zwischen den Stundenmitteln der Temperatur, der Globalstrahlung, des Dampfdrucks und der Windgeschwindigkeit wurden jedoch insgesamt sehr gut wiedergegeben (nicht gezeigt).

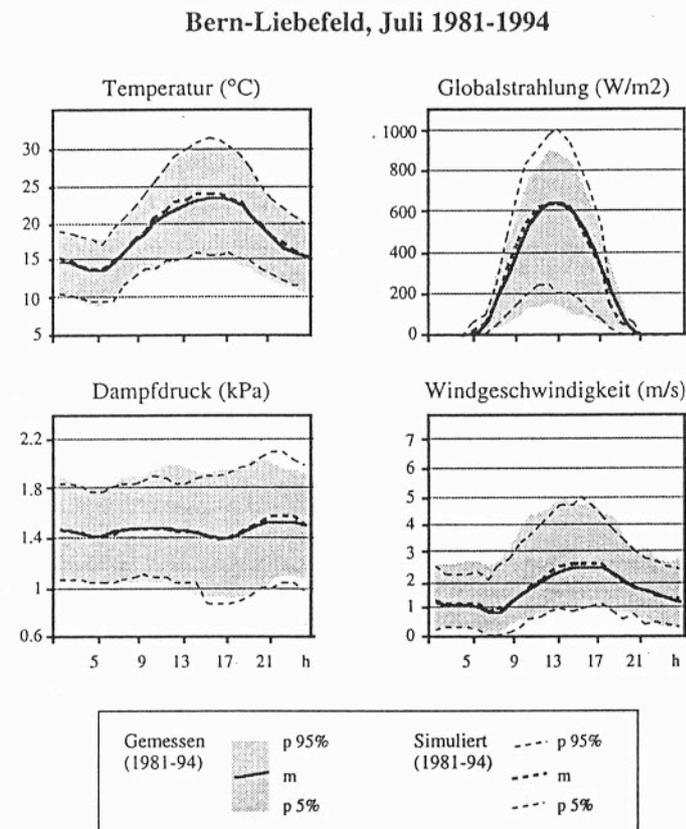


Fig. 84: Vergleich gemessener (grau) und mit dem Wettergenerator *WeathGen* simulierter (gestrichelt) langjähriger Statistiken der Tagesverläufe stündlicher Wettervariablen für den Standort Liebefeld-Bern im Juli, Periode 1981-1994.

Gezeigt werden die langjährigen Erwartungswerte, sowie die 5%-95%-Perzentile der Stundenmittel. Die simulierten Statistiken beziehen sich auf eine anhand 22 monatlicher Eingangsvariablen erzeugte 14-jährige Realisierung von Stundenwerten. Die Eingangsvariablen wurden aus den stündlichen Messungen der Periode 1981-1994, die Parameter des Wettergenerators aus Messungen in der Periode 1981-1985 ermittelt.

Tägliches Wetter

In Fig. 86 werden die für den Standort Bern von *WeathGen* simulierten, langjährigen monatlichen Verteilungen ausgewählter täglicher Wettervariablen mit den jeweils aus den Messungen bestimmten Verteilungen verglichen.

Für die meisten Monate wurde die relative Häufigkeit von Ereignissen der kleinsten Niederschlagsklasse (hier 0.1mm bis 2mm) zu Gunsten der nächsthöheren Niederschlagsklassen systematisch unterschätzt (Fig. 86, oben). Die relativen Häufigkeiten der starken Niederschlagsereignisse (\geq ca. 12 mm) wurden ebenfalls eher unterschätzt (siehe auch Fig. 90). Die monatlichen Anzahlen von Tagen mit Niederschlag wichen definitionsgemäss (Fig. 83) nur wenig von den monatlichen Vorgaben ab; somit betrug der MRF (MARF) im Mittel über alle Monate der Verifikationsperiode nur ca. -3% (6%) der jeweils gemessenen Monatswerte. Für die mittlere Längen der Trockenperioden (in Tagen) wurden ein MRF (MARF) von +4% (33%) und für die täglichen Übergangswahrscheinlichkeiten p_{11} und p_{00} (siehe Tabelle 37) von -6% (20%) bzw. von +1% (16%) erhalten.

Fig. 86 (Mitte) zeigt, dass die langjährigen Verteilungen der Tagesmittel der Globalstrahlung, der Temperatur, des Dampfdrucks und der Windgeschwindigkeit insgesamt gut simuliert wurden. Die monatlichen Mittelwerte und Standardabweichungen der Verteilungen wurden definitionsgemäss (siehe Fig. 83) mit hoher Genauigkeit reproduziert.

Die 5% - bzw. 95% -Perzentile wurden im Mittel über alle Kalendermonate für die Temperatur mit einem MAF von 0.36 °C bzw. 0.31 °C reproduziert. Für die Globalstrahlung wurden MARF von 21% bzw. 4%, für den Dampfdruck von 3% bzw. 2% und für die Windgeschwindigkeit von 25% bzw. 7% erhalten (alle Angaben in % der jeweils aus den Messungen ermittelten Perzentile).

Für die langjährigen absoluten Minima und Maxima der Tagesmittel ergaben sich insgesamt etwas grössere Abweichungen; im Mittel über alle Kalendermonate betragen die MAF für die Temperatur 0.8 °C bzw. 2.1 °C und die MARF für die Globalstrahlung 100% bzw. 15%, für den Dampfdruck 26% bzw. 7% und für die Windgeschwindigkeit 54% bzw. 3% (Fig. 86). Ähnliche Resultate wurden auch für alle weiteren, in Fig. 86 nicht gezeigten, täglichen Variablen erhalten.

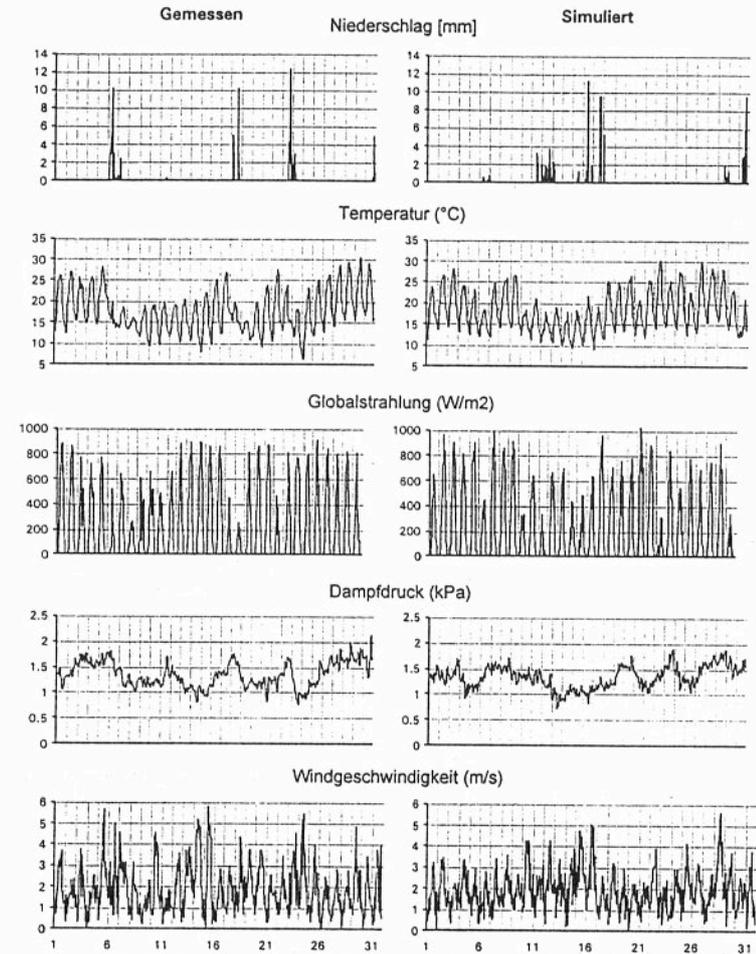


Fig. 85: Beispielhafter Vergleich gemessener (*links*) und mit dem Wettergenerator *WeathGen* simulierter (*rechts*) stündlicher Wettervariablen für den Standort Liebefeld-Bern im Juli 1986.

Für den Niederschlag werden die Stundensummen, für die restlichen Variablen die Stundenmittel gezeigt. Die Simulation wurde durch 22 monatliche Wetterstatistiken für Juli 1986 angetrieben, die aus den stündlichen Messungen (*links*) ermittelt wurden. Die Parameter des Wettergenerators wurden aus Messungen in der Periode 1981-1985 ermittelt.

Die nach trockenen und feuchten Tagen getrennt ermittelten langjährigen Verteilungen der täglichen Variablen (nicht gezeigt) wurden ebenfalls gut reproduziert: im Schnitt über alle Kalendermonate betrug der MAF zwischen den gemessenen und den simulierten langjährigen Monatsmitteln aller trockenen oder feuchten Tage für die täglichen Temperaturvariablen ca. $0.35\text{ }^{\circ}\text{C}$ (siehe auch Fig. 90) und für alle restlichen Variablen ca. 5-10% der jeweils aus den Messungen hergeleiteten langjährigen Mittelwerte. Die langjährigen Standardabweichungen der Verteilungen für die trockenen und feuchten Tage wurden ebenfalls mit guter Genauigkeit, typischerweise mit einem MAF von weniger als $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ für die Temperatur und einem MARF von weniger als 15% für die anderen Variablen, reproduziert.

Die Autokorrelations-Koeffizienten der verschiedenen täglichen Variablen wurden ähnlich wie bei den stündlichen Variablen allgemein unterschätzt. So betragen z.B. im Mittel über alle Monate und Jahre der Verifikationsperiode die gemessenen Autokorrelations-Koeffizienten für die Tagesmittel der Temperatur 0.61, der Globalstrahlung 0.17, des Dampfdrucks 0.59 und der Windgeschwindigkeit 0.25, während die Simulation mittlere Werte von 0.46, 0.09, 0.43 und 0.12 ergab. Die Kreuzkorrelations-Koeffizienten zwischen den verschiedenen täglichen Variablen wurden jedoch insgesamt sehr gut wiedergegeben: im Mittel über alle Monate und Jahre der Verifikationsperiode, sowie alle Elemente der monatlichen 10×10 Kreuz-korrelations-Matrizen, wurden ein MF von ~ 0 und ein MAF von nur ~ 0.09 erhalten.

Anwendung auf das REGÖK-Simulationsmodell

Die Anwendung der stochastisch simulierten jährlichen Wetterverläufe auf das REGÖK-Modell ergab im Vergleich zu den mit den original stündlichen Messdaten erhaltenen Resultaten insgesamt etwas höhere Jahreserträge (Fig. 87, links). Die mittlere Abweichung (bzw. die mittlere absolute Abweichung) über alle Jahre 1981-1994 betrug in Bern-Liebfeld $+1.4\%$ (2.7%) der jeweils anhand der Messdaten erhaltenen Jahreserträge. Für La Chaux-de-Fonds betragen die Abweichungen $+2.9\%$ (3.0%).

Für die Summen der Evapotranspiration in der Vegetationsperiode (Fig. 87, rechts) waren die Fehler in der gleichen Grössenordnung wie für den Jahresertrag, doch wurde keine systematische Überschätzung gefunden. Die mittleren Abweichungen (die mittleren absoluten Abweichungen) betragen in Bern-Liebfeld -1.9% (3.8%) und in La Chaux-de-Fonds $+1.5\%$ (2.4%).

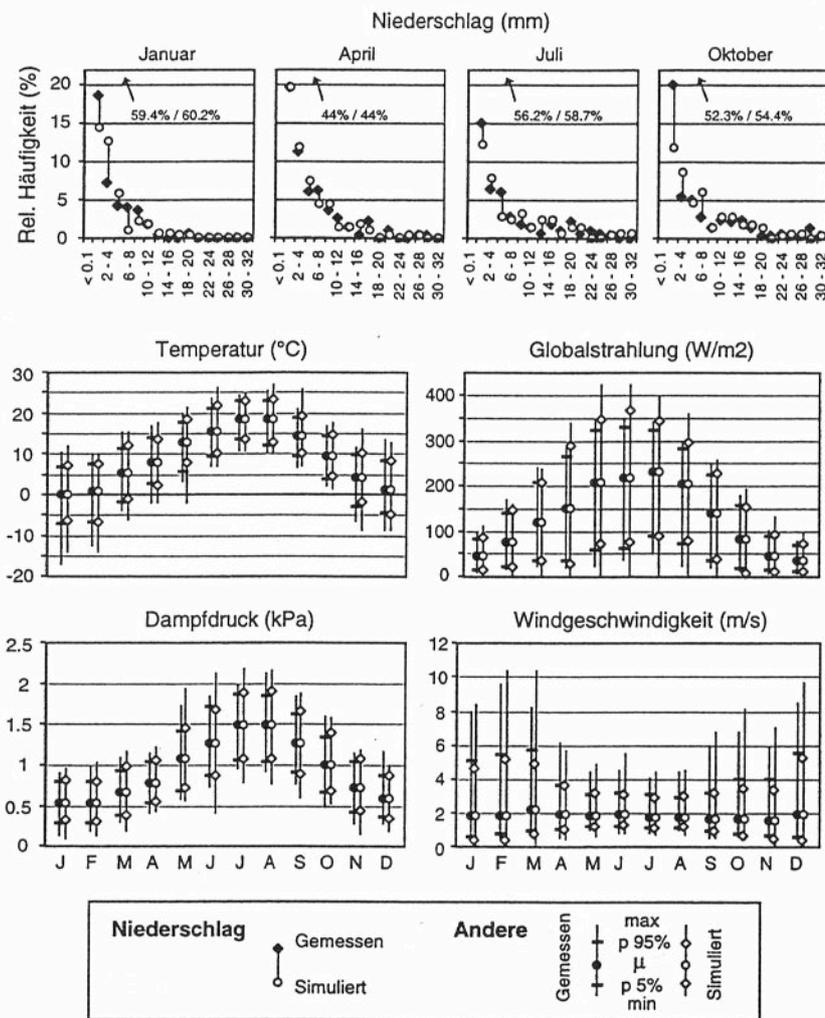


Fig. 86: Vergleich der langjährigen monatlichen Verteilungen täglicher Wettervariablen aus Messungen und aus einer mit dem Wettergenerator *WeathGen* generierten Realisierung von Tageswerten für den Standort Bern in der Periode 1986-1994. Beim Niederschlag werden die Verteilungen der täglichen Niederschlagssummen, bei allen anderen Variablen jene der jeweiligen Tagesmittelwerte aus den zwei 9-Jahresperioden miteinander verglichen. Als Eingangsgrößen für die Simulation dienten 22 Wettervariablen mit einem monatlichen Zeitschritt. Die Parameter des Wettergenerators wurden aus Messungen in den Jahren 1981-1985 ermittelt.

Aus Fig. 87 ist schliesslich zu ersehen, dass die Jahr-zu-Jahr Schwankungen der beiden Ausgangsgrössen insgesamt gut wiedergegeben wurden. Die Korrelationskoeffizienten zwischen den jeweiligen Paaren von Zeitreihen betragen für den Jahresertrag 0.80 in Bern-Liebefeld und 0.86 in La Chaux-de-Fonds, für die Summen der Evapotranspiration 0.80 und 0.97.

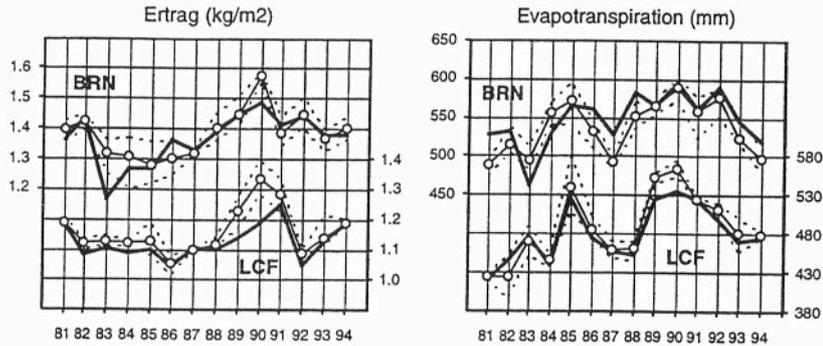


Fig. 87: Vergleich der mit dem REGÖK-Simulationsmodell an den Standorten Bern (BRN) und La Chaux-de-Fonds (LCF) berechneten Jahreserträge (Trockensubstanz, links) und Summen der Evapotranspiration in der Vegetationsperiode (rechts) aufgrund gemessener (dicke Linien) und vom Wettergenerator *WeathGen* simulierter (dünne Linien) stündlicher Wetterdaten.

Ausgezogene dünne Linien (bzw. Kreise) zeigen die Mittelwerte, gestrichelte Linien die Extrema aus je 9 verschiedenen stochastischen Simulationen per Standort mit verschiedenen Initialwerten für den Wettergenerator. Alle 9 Simulationen per Standort wurden mit den gleichen, mit einem monatlichen Zeitschritt vorgegebenen 22 Wettervariablen angetrieben, die zuvor für jeden Monat aus den stündlichen Messungen ermittelt wurden. Die Parameter des Wettergenerators wurden separat für jeden Standort in der Periode 1981-1985 ermittelt.

Die gefundenen Abweichungen waren kleiner als die bei der Validierung des REGÖK-Modells aufgetretenen Modellfehler. So betrug z.B. die Differenz zwischen den für Ostermundigen und Oberbütschel simulierten und den an diesen Standorten experimentell ermittelten Jahreserträgen im Mittel +8.5%. Die gefundenen Abweichungen waren ebenfalls klein im Vergleich zu den durch unsichere Parameterwerte eingeführten Unsicherheiten, welche in einigen Fällen für den Jahresertrag bei $\pm 10\%$ liegen (siehe Kap. 8).

9.3.3 Klima- und Wetterszenarien

Szenarien für monatliche Klimaparameter

Fig. 88 zeigt die aus den zwei GCM-Simulationen erhaltenen lokalen Klimaszenarien für Bern-Liebefeld und La Chaux-de-Fonds. Gezeigt werden die Veränderungen der Erwartungswerte nur sieben ausgewählter monatlicher Wettervariablen. Die erhaltenen Veränderungen für alle 22 in der Regionalisierungsprozedur berücksichtigten Variablen sind im Anhang D zu finden. Im ECHAM-Szenario (Fig. 88, oben) wurden im Mittel über die beiden Standorte für das Jahresmittel der Temperatur eine Veränderung von +1.4 °C und für den Jahresniederschlag von -4.7% erhalten. Das CCC-Szenario (Fig. 88, unten) ergab mittlere Veränderungen von +2.8 °C bzw. +5.9%. Die Jahresverläufe und die Muster der Veränderungen zeigten in beiden Szenarien teilweise starke Ähnlichkeiten zwischen den beiden Standorten. So ergaben beide Szenarien zu allen Jahreszeiten einen generellen Anstieg des Dampfdrucks, sowie im Sommerhalbjahr eine im Schnitt grössere Erwärmung der monatsmittleren Temperaturmaxima als der Temperaturminima. Die für den Niederschlag sowie die Globalstrahlung erhaltenen Veränderungen zeigten hingegen eine insgesamt stärkere Abhängigkeit vom Standort.

Unter dem ECHAM-Szenario (Fig. 88, oben) wurden im Mittel über alle Monate der Vegetationsperiode (März-Oktober) die folgenden Veränderungen erhalten: die Niederschlagswahrscheinlichkeit änderte in Bern-Liebefeld (La Chaux-de-Fonds) relativ zum Erwartungswert der Periode 1901-80 um -3.8% (-5.4%) und die Niederschlagssumme um -0.2% (-3.0%). Für die Globalstrahlung wurden Veränderungen von +4.3% (+1.9%), für die Temperaturminima von +1.7 °C (+1.3 °C), für die Temperaturmaxima von +1.8 °C (+1.8 °C), für den Dampfdruck von +10% (+11%) und für die Windgeschwindigkeit von +22% (+8%) erhalten. Das CCC-Szenario (Fig. 88, unten) ergab insgesamt grössere Veränderungen. Diese betragen im Mittel über die Monate März-Oktober in Bern-Liebefeld (La Chaux-de-Fonds) für die Niederschlagswahrscheinlichkeit -3.6% (-5.0%), für die die Niederschlagssumme +5.7% (+5.3%), für die Globalstrahlung +7.3 (+2.3%), für die Temperaturminima +2.9 °C (+2.3 °C), für die Temperaturmaxima +3.1 °C (+2.9 °C), für den Dampfdruck +18% (+20%) und für die Windgeschwindigkeit +53% (+35%).

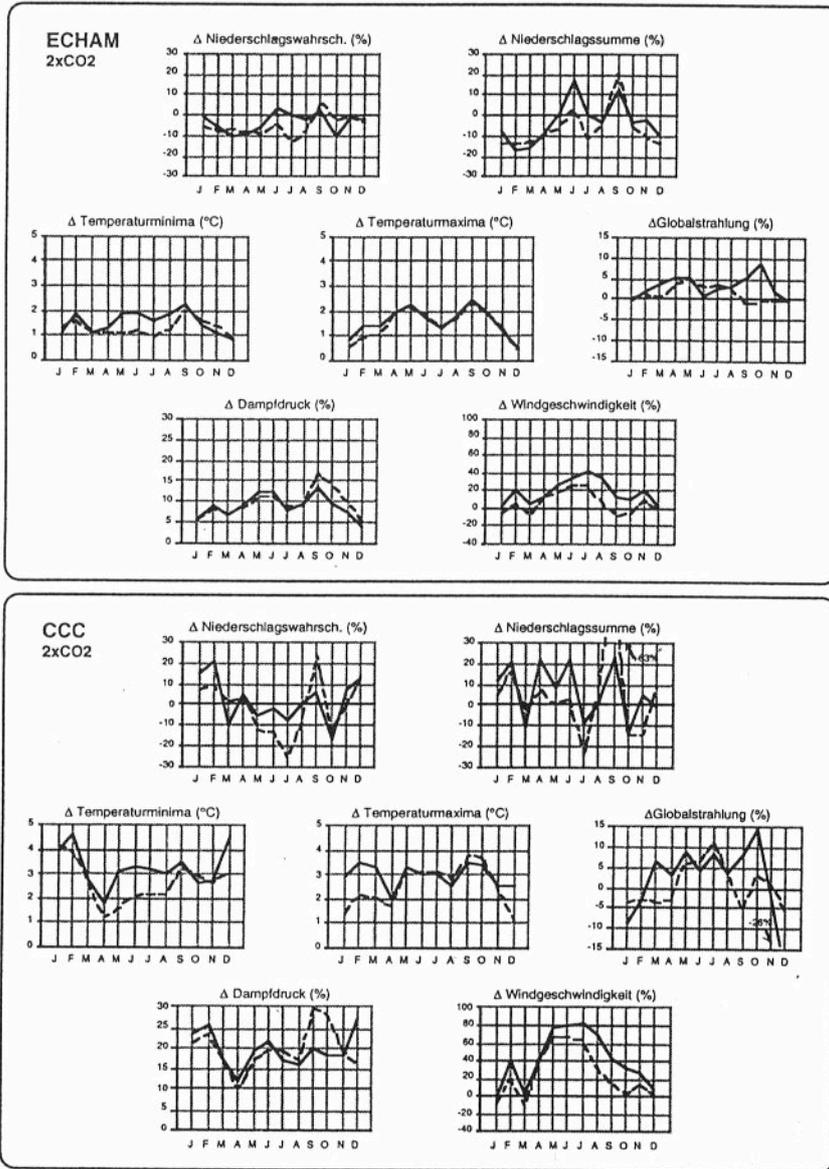


Fig. 88: Zwei Szenarien für mögliche Veränderungen (D) der Erwartungswerte monatlicher Wettervariablen für Bern (durchgezogen) und La Chaux-de-Fonds (gestrichelt).

Die Szenarien wurden mittels der statistischen Regionalisierungsmethode von Gyalistras *et al.* (1994) aus zwei Simulationen einer globalen Klimaänderung mit dem ECHAM1/LSG-GCM (Cubasch *et al.*, 1992, *oben*) und dem CCC-GCMII (Boer *et al.*, 1992, *unten*) hergeleitet. Die globalen Simulationen beruhen auf der Annahme einer Erhöhung des atmosphärischen CO₂-Gehaltes von 344 ppmv auf 720 ppmv (ECHAM), bzw. von 330 ppmv auf 660 ppmv (CCC). Alle Veränderungen sind bezüglich der für die Referenzperiode 1901-1980 geschätzten Erwartungswerte angegeben (siehe Anhang C). Für numerische Werte, sowie Veränderungen der Erwartungswerte 15 weiterer Wettervariablen siehe Anhang D.

Für die Erwartungswerte der Tagesmittel der Temperatur, sowie der Tagesextrema des Dampfdrucks und der Windgeschwindigkeit waren die Veränderungen in beiden Szenarien in der gleichen Grössenordnung wie die jeweils oben angegebenen Beträge (siehe Anhang D). Für die innermonatlichen Standardabweichungen der Globalstrahlung wurden im Mittel über die Monate März-Oktober je nach Standort in beiden Szenarien mittlere Veränderungen von einigen Prozent erhalten. Für die Standardabweichungen der täglichen Temperaturvariablen ergaben sich je nach Standort, Szenario und täglicher Variable im Mittel über die Vegetationsperiode Abnahmen um ca. -1% bis -12%, während die Standardabweichungen der Dampfdruck-Variablen meistens zunahmen (ca. -1% bis +20%). Für die Standardabweichungen der täglichen Windgeschwindigkeiten waren die Veränderungen z.T. grösser, jedoch für die einzelnen Monate meistens uneinheitlich (Anhang D).

Auswirkungen auf das Wetter

Eine ausführliche Darstellung der mit den obigen Klimaszenarien assoziierten Veränderungen des Wetters an den beiden Standorten liegt ausserhalb des Rahmens der vorliegenden Arbeit. Hier beschränken wir uns deswegen auf ausgewählte Aspekte an nur einem der beiden Standorte, Bern-Liebefeld. Die Beispiele beziehen sich auf den Sommer, sowie das CCC-Szenario (Fig. 88, unten), welches von den grösseren Veränderungen ausgeht.

Der Effekt dieses Szenarios auf die von *WeathGen* simulierte langjährigen Verteilungen stündlicher Wettervariablen für Bern-Liebefeld im Juli ist in Fig. 89 dargestellt. Bei den Temperaturen ist erwartungsgemäss eine generelle Erwärmung festzustellen, wobei im Vergleich zur Referenzsimulation (Fig. 84) die 5%-Perzentile stärker als die 95%-Perzentile anstiegen.

Bern-Liebfeld, Juli (CCC-Szenario)

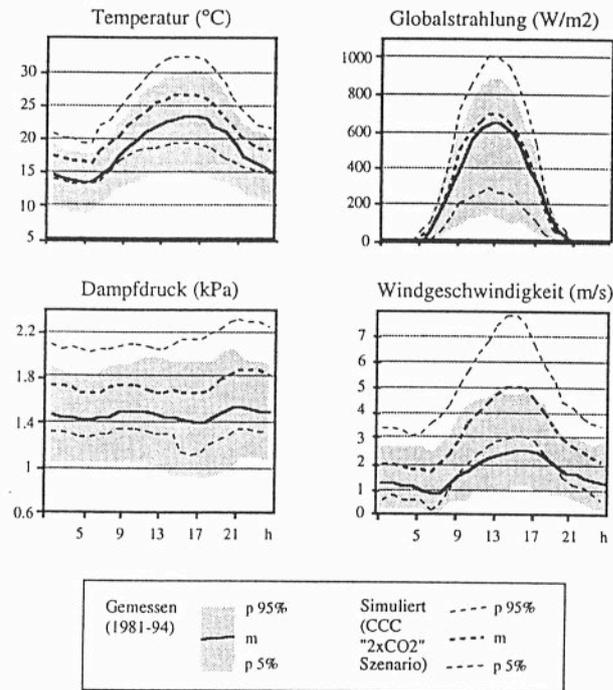


Fig. 89: Vergleich gemessener (grau) mit den unter einem Szenario eines zukünftigen Klimas (CCC-Szenario) (lang gestrichelt) vom Wettergenerator *WeathGen* simulierten Statistiken der Tagesverläufe stündlicher Wettervariablen für Bern im Juli. Gezeigt werden die langjährigen Erwartungswerte, sowie die 5%-95%-Perzentile der Stundenmittel. Die simulierten Statistiken beziehen sich auf eine anhand 22 monatlicher Eingangsvariablen erzeugte 14-jährige Realisierung von Stundenwerten. Für die Simulation wurden die monatlichen Messreihen der Jahre 1981-1994 auf die mittels der statistischen Regionalisierungsprozedur von Gyalistras *et al.* (1994) unter der vom CCC-GCMII bei einer Verdoppelung des atmosphärischen CO₂-Gehaltes simulierten Klimaänderung (Boer *et al.*, 1992) abgeschätzten neuen Erwartungswerte angepasst (siehe auch Figs. 81 und 88).

Bei der Globalstrahlung wurden für alle Stunden insgesamt höhere langjährige Mittelwerte und eine Abnahme der Spannbreite der stündlichen Werte simuliert. Beim Dampfdruck ergab sich eine generelle Verschiebung der stündlichen Verteilungen nach höheren Werten. Ein ähnlicher Effekt wurde auch bei den stündlichen Windgeschwindigkeiten erhalten, wobei unter der angenommenen sehr starken Erhöhung der täglichen Windgeschwindigkeiten die neuen langjährigen Mittelwerte für alle Stunden in der Nähe der heutigen 95%-Perzentile zu liegen kamen.

Die möglichen Auswirkungen des CCC-Szenarios auf die gemeinsame Verteilung der täglichen Niederschlagssummen und der tagesmittleren Temperaturen an nassen Tagen sind exemplarisch für Bern-Liebfeld und den Sommer in Fig. 90 (unten rechts) dargestellt. Zum Vergleich werden dieser Verteilung die aufgrund der Messungen in der Periode 1901-1994 ermittelte Verteilung (oben), sowie die für das heutige Klima simulierte Verteilung (unten links) gegenübergestellt. Man beachte, dass in allen drei Fällen jeweils nur die Temperaturmittel der nassen Tage (Niederschlag ≥ 1 mm) dargestellt sind. Wie aus Fig. 90 (unten links) zu ersehen ist, reproduzierte der Wettergenerator die gemessene Verteilung qualitativ weitgehend korrekt. Allerdings wurden für die Periode 1901-1994 mit 3'549 Niederschlagsereignissen (41% aller Tage) im Vergleich zu den Messungen (37.4%) zu viele nasse Tage simuliert. Die relativen Häufigkeiten der Ereignisse ≥ 12 mm (ca. 30% aller gemessenen Werte) wurden dabei systematisch unterschätzt, so dass die simulierte mittlere Niederschlagsintensität nur 9.0 mm Tag⁻¹ anstatt der gemessenen 9.8 mm Tag⁻¹ betrug. Die Verteilungsform der tagesmittleren Temperaturen an nassen Tagen wurde mit sehr guter Genauigkeit reproduziert. Allerdings war der simulierte Mittelwert mit 15.8 °C im Vergleich zu den Messungen um ca. 0.5 °C zu hoch.

Unter dem CCC-Szenario (Fig. 90, unten rechts) nahm im Einklang mit den vorgegebenen Veränderungen (Fig. 88, unten; Anhang D) die Zahl der simulierten Niederschlagstage relativ zur Simulation unter heutigen Klimabedingungen um ca. 4% ab (nur noch 39.4% aller Tage nass), die mittlere Niederschlagsintensität jedoch um ca. 10% auf 9.9 mm Tag⁻¹ zu. Die Temperatur der nassen Tage zeigten einen um ~ 2.5 °C höheren Mittelwert von 18.6 °C und eine um ca. 7% verkleinerte Standardabweichung von ~ 2.9 °C. Aufgrund der reduzierten Variabilität fielen unter dem Klimaänderungs-Szenario nur relativ wenig Temperaturen ausserhalb des gemessenen Temperaturbereichs (graue Flächen in Fig. 90). Die Tagesmittel an trockenen Tagen (nicht gezeigt) nahmen jedoch um nicht weniger als ~ 3.1 °C zu und schwankten somit um einem neuen, weit höheren Mittelwert von ca. 21 °C.

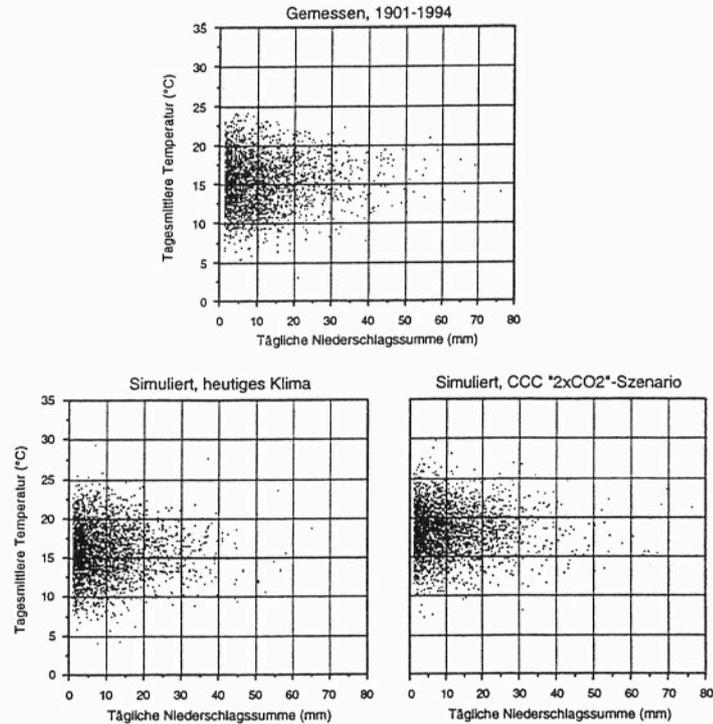


Fig. 90: Vergleich der aus Messungen ermittelten gemeinsamen Verteilung tagesmittlerer Temperaturen und täglicher Niederschlagssummen (*oben*) mit den unter dem heutigen Klima (*links unten*), bzw. unter einem Szenario eines zukünftigen Klimas (*rechts unten*) mit dem Wettergenerator *WeathGen* simulierten Verteilungen für den Standort Bern im Sommer (Juli bis August).

Nur für Tage mit Niederschlag ≥ 1 mm. Graue Flächen: Messbereich. Die Verteilungen beziehen sich auf zwei je 94 Jahre umfassende, anhand 22 monatlicher Eingangsvariablen erzeugte Realisierungen von Tageswerten. Die Eingangsvariablen wurden aus den täglichen Messungen 1901-1994 ermittelt. Für die Simulation unter geändertem Klima wurden die monatlichen Zeitreihen auf die mittels der statistischen Regionalisierungsprozedur von Gyalistras *et al.* (1994) unter der vom CCC-GCMII bei $2\times\text{CO}_2$ -Gehaltes simulierten Klimaänderung (Boer *et al.*, 1992) abgeschätzten neuen Erwartungswerte angepasst (siehe auch Figs. 81 und 88).

9.4 Diskussion

9.4.1 Gesamtmethodik

Die REGÖK-Fallstudie benötigte, ähnlich wie dies bei verschiedenen anderen Klimawirkungs-Studien ebenfalls der Fall ist, realitätsnahe, räumlich und zeitlich hoch aufgelöste, sowie sich über längere Zeiträume erstreckende Szenarien für gleichzeitig mehrere Wettervariablen. Diese Bedürfnisse führten zu teilweise widersprüchlichen Anforderungen an die Allgemeingültigkeit, Genauigkeit und Rechenzeit der zur Herleitung der Szenarien zu verwendenden Verfahren.

Unser Vorgehen (Fig. 81) stellt eine ausgleichende Lösung dar, die darauf abzielt, quantitative Information aus Simulationen mit globalen oder auch regionalen Klimamodellen möglichst gut mit statistisch-deskriptiven Modellen des heutigen Klimas zu kombinieren, um den teilweise widersprüchlichen Anforderungen möglichst optimal entsprechen zu können. Die Klimamodelle werden vor allem dazu benutzt, um physikalisch basierte Abschätzungen einer möglichen grossräumigeren Klimaänderung zu erhalten, während die statistischen Modelle dazu dienen, verschiedene Raum- und Zeitskalen zu überbrücken, sowie die spezifischen Muster des lokalen Wetters realitätsnah nachzubilden (Fig. 85).

Die vorgeschlagene Methodik unterscheidet sich von den bestehenden empirisch basierten Methoden. Letztere beruhen typischerweise entweder auf rein lokale, d.h. vom grossräumigen atmosphärischen Zustand unabhängige Wettergeneratoren (z.B. Richardson, 1981), deren Parameter für Klimawirkungsstudien gemäss Hinweisen aus GCM-Simulationen abgeändert werden können (z.B. Wilks, 1992), oder auf stochastische Modelle, welche das lokale Wetter in Funktion des kurzfristigen (normalerweise täglichen) grossräumigen Zustands der Atmosphäre simulieren (z.B. Zorita *et al.*, 1995). Unser Vorgehen stellt eine Zwischenlösung dar, bei welcher das lokale Wetter mit einer monatlichen Auflösung an die durch Klimamodelle zur Verfügung gestellte, grossräumige Information angekoppelt wird.

Die hier vorgestellte Gesamtmethodik erlaubte nach unserem Wissen erstmals, aus Simulationen möglicher zukünftiger Klimaänderungen mittels globaler Zirkulationsmodelle plausible, räumlich differenzierte Wetterszenarien mit einer stündlichen Auflösung für gleichzeitig mehrere Wettervariablen zu generieren. Ein strikter Nachweis für die interne Konsistenz und Gültigkeit der hergeleiteten Szenarien kann allerdings – wie dies bei allen Methoden zur Herleitung regionaler Klima- und Wetterszenarien prinzipiell der Fall ist – aufgrund einer Reihe von Unsicherheiten und Einschränkungen, die weiter unten noch ausführlicher diskutiert werden, nicht erbracht werden.

Die im Rahmen der vorliegenden Fallstudie erhaltenen Resultate legen jedoch nahe, dass die vorgeschlagene Methodik für den vorgesehenen Zweck von Nutzen ist und die gestellten hohen Anforderungen weitgehend zu erfüllen vermag: so bietet die Methodik eine sehr hohe räumliche Auflösung (Fig. 88); sie erlaubt es, Wetterszenarien unter im Prinzip beliebigen Annahmen über eine zeitabhängige Veränderung des Klimas über mehrere Jahrzehnte oder gar Jahrhunderte hinweg zu generieren (Fig. 81c, siehe auch Gyalistras & Fischlin 1995); sie bietet einen konzeptuellen Rahmen und die technischen Voraussetzungen für ausführliche Sensitivitätsanalysen, anhand derer die für eine bestimmte Anwendung wichtigsten Aspekte des lokalen Klimas und Wetters ermittelt werden können; und schliesslich erlaubt sie, das lokale Wetter mit einer für die vorliegende Anwendung genügenden statistischen Genauigkeit und Realitätsnähe zu simulieren (Figs. 85 und 87).

9.4.2 Repräsentativität der ausgewählten Klimastationen

Die Repräsentativität der beiden ausgewählten Klimastationen Bern-Liebefeld und La Chaux-de-Fonds für andere Standorte von Grünland-Ökosystemen innerhalb des Schweizerischen Mittellandes hängt zusätzlich zum Klima auch von einer Reihe weiterer Standortfaktoren ab. In diesem Abschnitt wird jedoch nur der klimatische Aspekt diskutiert.

Das in dieser Studie verwendete Ähnlichkeits- bzw. Distanzmass zur Ermittlung der beiden repräsentativen Klimastationen stellte nur eine von mehreren im Prinzip zur Verfügung stehenden Masszahlen dar (siehe z.B. Balling, 1984). Es ist möglich, dass wir mit einem alternativen Ähnlichkeitsmass zu einem anderen Resultat gekommen wären. Die Ermittlung der beiden Klimastationen stützte sich zudem auf die Analyse der Vegetationsperiode nur des Jahres 1993.

Ein Vergleich mit anderen Klimastationen ergab jedoch, dass die beiden ausgewählten Standorte die *mittleren* Klimata der Höhenlagen 300 m - 800 m (Bern-Liebefeld), bzw. 800 m - 1200 m (La Chaux-de-Fonds) vermutlich sehr gut repräsentieren: die langjährigen (1961-1990) Monatsmittel der Temperatur und des Niederschlags von Bern-Liebefeld (La Chaux-de-Fonds) zeigten im Vergleich zu den aus 38 (10) weiteren Standorten des Mittellandes ermittelten mittleren Jahreszyklen der jeweiligen Höhenlagen für die einzelnen Monate absolute Abweichungen von im Mittel nur 0.1 °C (0.6 °C) bzw. ca. 12% (12%).

Trotz dieser guten Übereinstimmung gibt es Gründe, warum die beiden Standorte im Hinblick auf die vorliegende Anwendung nur bedingt repräsentativ sind: Erstens wichen die mit dem REGÖK-Simulationsmodell für Ostermündigen und Bern-Liebefeld erhaltenen Resultate stark voneinander ab. Da die zwei Standorte sehr ähnliche monatliche Temperatur- und Niederschlagsverläufe aufwiesen, schlossen wir, dass die monatlichen Temperaturen und Nie-

derschläge das Lokalklima im Hinblick auf die vorliegende Anwendung nur unzureichend charakterisieren. Zweitens zeigten die Simulationen für Oberbütschel und La Chaux-de-Fonds, dass das REGÖK-Simulationsmodell sensitiv auf die innerhalb einer bestimmten Höhenlage des Mittellandes auftretende klimatische Streubreite reagiert. Für die Höhenklasse 800 m - 1200 m beträgt diese Streubreite im langjährigen Mittel und im Schnitt über die Monate März bis Oktober für die Temperatur ca. ± 1.1 °C und für den Niederschlag ca. $\pm 30\%$. Die klimatischen Unterschiede zwischen Oberbütschel und La Chaux-de-Fonds waren von der gleichen Grössenordnung.

Schliesslich zeigten die monatlichen Klimaszenarien (Fig. 88), dass innerhalb des Schweizerischen Mittellandes bereits innerhalb kleiner Distanzen regional unterschiedliche Klimaänderungen zu erwarten sind. Die Unterschiede in der Stärke der Klimaänderung zwischen den beiden ausgewählten Standorten betragen im Mittel über die Monate März bis Oktober für die Temperatur zwar nur ~ 0.2 °C und für den Niederschlag einige %. Das Mittelland besitzt jedoch eine uneinheitliche Topographie und seine Ausdehnung beträgt ein Mehrfaches der Entfernung zwischen den beiden Standorten. Somit ist zu erwarten, dass die räumliche Komponente der Klimaänderung (siehe auch die Kartendarstellungen in Gyalistras & Fischlin 1995) im Hinblick auf die vorliegende Anwendung wichtig ist, bzw. die Repräsentativität der an einzelnen Raumpunkten erhaltenen Abschätzungen möglicher Klimawirkungen weiter herabsetzt.

Allerdings ist zu beachten, dass die obigen Darlegungen sich vor allem auf die mit dem REGÖK-Simulationsmodell erhaltenen Resultate abstützen. Dabei gingen wir davon aus, dass die hohe Sensitivität des Modells der wahren klimatischen Sensitivität der Grassländer des Schweizerischen Mittellandes entspricht. Sollte das Modell die wahre Sensitivität überschätzen, dürfte die Repräsentativität der beiden ausgewählten Standorte insgesamt etwas grösser sein als aus den obigen Ausführungen hervorgeht.

Die Ermittlung der durch die zwei ausgewählten Standorte letztlich repräsentierten Gebiete bedarf weiterer Untersuchungen. Ein erster Ansatz könnte darin bestehen, weitere Modellsimulationen an möglichst vielen, gleichmässig über das Mittelland verteilten Standorten durchzuführen. Eine zweite Möglichkeit wäre, zuerst anhand von Sensitivitätsanalysen mit dem Wettergenerator diejenigen monatlichen Wettervariablen zu ermitteln, welche am besten mit den Ausgangsgrössen des Simulationsmodells korrelieren. Die räumlichen Verteilungen dieser Schlüsselvariablen könnten dann zur räumlichen Interpretation der punktuellen Modellresultate weiterverwendet werden.

9.4.3 Klima- und Wetterszenarien

Allgemeine Bemerkungen

Die in Fig. 88 gezeigten lokalen Klimaszenarien spiegeln zwei spezifische globale Klimaänderungen wieder, wie sie durch die beiden verwendeten GCM-Simulationen vorgegeben wurden. Es ist davon auszugehen, dass wir mit anderen Klimamodellen oder anderen Ausgangsannahmen als eine Verdoppelung des atmosphärischen CO₂-Gehalts qualitativ wie quantitativ andere Resultate erhalten hätten. Die ECHAM-Simulation ergab eine Erhöhung der global und annuell gemittelten bodennahen Temperatur um +1.7 °C (Cubasch *et al.*, 1992) und die CCC-Simulation um +3.5 °C (Boer *et al.*, 1992). Im Vergleich dazu ergaben andere GCMs ebenfalls unter der Annahme einer Verdoppelung des atmosphärischen CO₂-Gehaltes globale Temperaturerhöhungen zwischen 1.7 °C und 5.3 °C, wobei Werte über 4.5 °C eher die Ausnahme bildeten (Houghton *et al.* 1990, 1992). Die zwei verwendeten Simulationen können somit als grob repräsentativ für die Unsicherheiten angesehen werden, die mit der Abschätzung der Stärke einer 2xCO₂-Klimaänderung einhergehen.

Ob und wann die simulierten Klimaänderungen möglicherweise eintreten könnten ist mit sehr grossen Unsicherheiten behaftet. Die zukünftige Entwicklung des globalen Klimas hängt nicht nur vom zu-künftigen Verlauf des atmosphärischen CO₂-Gehaltes und aller anderen Treibhausgase, sondern auch von den zukünftigen Konzentrationen und räumlichen Verteilungsmustern der kühlenden Sulfat-Aerosole (z.B. Mitchell *et al.* 1995) ab. Zusätzliche Unsicherheiten werden unter anderem durch zufällige Einflüsse (z.B. der vulkanischen Aktivität), durch in den globalen Klimamodellen bisher noch nicht berücksichtigte Prozesse (z.B. Rückkopplungen seitens der Biosphäre), sowie durch die bisher nicht gut verstandene natürliche Variabilität des Klimasystems eingebracht.

Aus diesen Gründen, sowie aufgrund weiterer Unsicherheiten und Probleme auf der regionalen Skala (siehe unten) sind die vorliegenden regionalen Szenarien nicht als Prognosen zu verstehen. Die Szenarien stellen lediglich grobe Abschätzungen hypothetischer lokaler Gleichgewichtsklimata und Wetterverhältnisse dar, wie sie nach einer Stabilisierung aller Treibhausgase auf dem 2xCO₂-Niveau vorherrschen könnten. Die Szenarien können aber auch als Schnappschüsse möglicher zukünftiger klimatischer Zustände, wie sie bei einer weiterhin ungebremsen Akkumulation von Treibhausgasen in der Atmosphäre auftreten könnten, angesehen werden.

Unter dem *Business-As-Usual* (oder *non-intervention*) Szenario für Treibhausgasemissionen, welches von einer Verdoppelung des CO₂-Äquivalents aller Treibhausgase ca. im Jahr 2030 ausgeht (Houghton *et al.*, 1990, 1994), könnte

die zu den 2xCO₂-Verhältnissen gehörige globale Klimaänderung gemäss der verzögerten Aufheizung der Ozeane ca. um das Jahr 2050 herum, je nach weiteren Annahmen (natürliche Variabilität, Aerosole etc.) aber auch einige Jahrzehnte früher oder später, durchlaufen werden.

Konsistenz der Szenarien

Es gibt mehrere Gründe, welche dafür sprechen, dass die regionalen Klimaszenarien und die daraus resultierenden stündlichen Wetterszenarien unter den jeweiligen Ausgangsannahmen in sich konsistente Bilder möglicher zukünftiger Klimaänderungen darstellen:

Erstens konnte dank der Verwendung zweier globaler Klimamodelle von physikalisch konsistenten Abschätzungen einer möglichen Veränderung des grossräumigen Klimas ausgegangen werden. Wie eigene Voruntersuchungen, sowie die Untersuchungen von Cubasch *et al.* (1992), von Storch *et al.* (1993) und Zorita *et al.* (1995) für das ECHAM- und von McFarlane *et al.* (1992) für das CCC-GCM zeigten, wurden die von der Regionalisierungsprozedur benötigten atmosphärischen Felder, sowie deren Jahr-zu-Jahr Variabilität für heutige Klimabedingungen von den beiden Klimamodellen relativ zuverlässig reproduziert. Dies spricht dafür, dass die GCMs auch die aufgrund einer CO₂-Erhöhung zu erwartende grossräumige Klimaänderung mindestens in groben Zügen konsistent wiedergeben können. Die relativ starke globale (und regionale) Erwärmung unter der CCC-Simulation ist zum Teil auf die Verwendung eines nur stark vereinfachten Zweischichten-Ozeanmodells im CCC-GCM zurückzuführen. Im Gegensatz dazu beinhaltet das ECHAM-GCM ein voll an die Atmosphäre gekoppeltes, dreidimensionales ozeanisches Zirkulationsmodell, welches unter 2xCO₂-Bedingungen eine Abschwächung der thermohalinen Zirkulation simuliert. Diese führt zu einer grossräumigen Reduktion der Erwärmung über dem Nordatlantik (Cubasch *et al.*, 1992, 1995), die zu einer insgesamt kleineren Erwärmung an unsere vom ozeanischen Klima beeinflussten Standorte beiträgt. Andererseits traten zwischen den beiden regionalen Klimaszenarien auch mehrere Gemeinsamkeiten auf, welche mit ähnlichen Mustern der grossräumigen Klimaänderung in den beiden GCM-Simulationen, wie z.B. eine generell grössere Erwärmung in den höheren Breiten und über die Kontinente, zusammenhängen. Die Ähnlichkeiten könnten jedoch teilweise auch davon herrühren, dass bei der Regionalisierung mögliche Veränderungen in den oberen Atmosphärenschichten nicht explizit mitberücksichtigt wurden, und dass die monatliche Regionalisierungsprozedur feinere Unterschiede zwischen den beiden grossräumigen Klimaänderungen nicht aufzulösen vermochte.

Zweitens basierte die verwendete Regionalisierungsprozedur auf physikalisch plausible statistische Zusammenhänge zwischen dem grossräumigen und dem regionalen Klima (Gyalistras *et al.* 1994, 1997), welche zu räumlich als auch

zwischen den Variablen konsistenten lokalen Klimaänderungen führten. Zur Illustration seien hier nur zwei Beispiele angegeben: so führte eine in der CCC-Simulation für den April erhaltene massive Verstärkung der nördlichen Strömungskomponente zu einer starken Reduktion der Erwärmung, die im mehr exponierten La-Chaux-De-Fonds besonders gross ausfiel (Fig. 88 unten); oder die erhaltenen Zunahmen der Globalstrahlung gingen in beiden Szenarien plausiblerweise mit einer generellen Abnahme der Niederschlagswahrscheinlichkeiten und einer Erhöhung der täglichen Temperaturamplituden einher. Eine ausführlichere Diskussion der beiden regionalen Szenarien ist für das ECHAM-Szenario in Gyalistras *et al.* (1994) und für das CCC-Szenario in Fischlin & Gyalistras (1996) zu finden.

Drittens stehen die erhaltenen Szenarien nicht im Widerspruch zu den Resultaten aus Simulationen mit regionalen Klimamodellen. Ein Vergleich drei regionaler Klimaänderungs-Simulationen (Giorgi *et al.*, 1992; Frey-Buness *et al.*, 1993; Beniston *et al.*, 1995) über den Alpen ergab für die $2\times CO_2$ -Sensitivität der jahres- und gebietsmittleren Temperatur einen Bereich zwischen $+1.3\text{ }^\circ\text{C}$ und $+3.5\text{ }^\circ\text{C}$, während für den Niederschlag Werte zwischen -5% und $+20\%$ erhalten wurden (Gyalistras *et al.*, 1997). Die in unseren Szenarien erhaltenen jahresmittleren Veränderungen sind konsistent mit diesen Resultaten. Für einzelne Monate wurden zwar teilweise grössere Veränderungen erhalten, doch ist zu beachten, dass für einzelne Standorte und bei einer monatlichen Auflösung grundsätzlich grössere Sensitivitäten als für regionale und annuelle Mittelwerte zu erwarten sind. Die in unseren Szenarien vorgefundene Tendenz zu einer Abnahme der innermonatlichen Temperaturvariabilität ähnelt dem Resultat, das Mearns *et al.* (1995) anhand einer regionalen Klimasimulation für ein anderes Gebiet der mittleren Breiten (USA) erhalten haben. Die gefundene generelle Zunahme des Dampfdrucks ist des Weiteren im Einklang mit globalen Klimasimulationen, wonach die relative Feuchte der Atmosphäre unter einem wärmeren Klima näherungsweise konstant bleiben könnte (z.B. Mitchell & Ingram, 1992).

Schliesslich konnte gezeigt werden, dass der Wettergenerator im Hinblick auf die vorliegende Anwendung genügend realistische stündliche Wetterverläufe generiert (Fig. 87). Die mit dem Wettergenerator erhaltenen Simulationsergebnisse zeigten zwar im Vergleich zu den anhand der Originaldaten simulierten Ausgangsgrössen sowohl einige systematische (z.B. die generelle Überschätzung des Jahresertrags), als auch zufällige Abweichungen (gestrichelte Linien in Fig. 87). Die systematischen Abweichungen gingen zum Teil auf behebbare Fehler des Wettergenerators (z.B. auf die Überschätzung der Häufigkeit hoher Werte für die Globalstrahlung, siehe Figs. 84 und 86) zurück. Die zufälligen Abweichungen entsprachen hingegen grösstenteils dem Informationsverlust aufgrund des Übergangs von der stündlichen nach der monatlichen

Auflösung der Eingangsdaten. Da die zufälligen Abweichungen jedoch relativ klein im Vergleich zu den Jahr-zu-Jahr Schwankungen der Ausgangsgrössen waren, schlossen wir, dass der Wettergenerator im Hinblick auf die vorliegende Anwendung unter einem weiten Bereich von Witterungs- bzw. klimatischen Bedingungen brauchbar ist.

Probleme und Einschränkungen

Die Einschränkungen globaler Klimaprognosen wurden weiter oben bereits besprochen. Hier sollen die grundsätzlichen Probleme der verwendeten Gesamtmethodik, sowie einige spezifische Probleme, die im Zusammenhang mit der Fallstudie auftraten, näher erörtert werden. Die prinzipiellen Probleme der verwendeten Methodik sind:

(1) *Beschränkte Gültigkeit der empirischen Modelle.* Wie bei anderen empirischen Ansätzen beruhen die hergeleiteten Wetterszenarien auf einer rein statistischen Beschreibung des Zusammenhangs zwischen dem grossräumigen und dem lokalen Klima. Die Beschreibungen der lokalen Wettervariabilität, sowie der Beziehungen zwischen den lokalen Wettervariablen mittels des lokalen Wettergenerators sind ebenfalls nur empirisch abgestützt. Somit wird die Präzision der resultierenden Wetterszenarien durch eine Reihe nicht explizit berücksichtigter Faktoren stark eingeschränkt. Unter den zukünftigen Bedingungen könnten sich z.B. der statistische Zusammenhang zwischen dem globalen und dem regionalen Klima (z.B. aufgrund veränderter Meeresoberfläche-Temperaturen), die Dynamik des Regionalklimas (z.B. aufgrund von Veränderungen der Vegetation oder des regionalen Wasserhaushalts), wie auch die Randbedingungen des Lokalklimas (z.B. aufgrund von Landnutzungsänderungen), systematisch verändern. Nachträglich gewonnene Information über die möglichen Auswirkungen solcher Veränderungen kann jedoch durch die Anpassung der monatlichen Szenarien oder der Parameter des Wettergenerators jederzeit eingebracht werden. Schliesslich ist zu beachten, dass selbst unter der Annahme dass die statistischen Modelle den zukünftigen Bedingungen insgesamt gerecht würden die Modelle bei der Generierung der Szenarien zum Teil ausserhalb des Bereichs betrieben werden müssen, welcher zur Schätzung der Modellparameter zur Verfügung stand (siehe Figs. 89 und 90). Die erhaltenen Szenarien sind somit zum Teil als Extrapolationen aufzufassen, deren physikalische Konsistenz durch Vergleiche mit alternativen Regionalisierungsprozeduren, sowie Studien mit regionalen Klimamodellen oder Mikroklima-Modellen weiter untersucht werden sollte.

(2) *Vereinfachte Darstellung der zeitlichen Variabilität.* Die zeitliche Variabilität des lokalen Wetters wurde in mehrfacher Hinsicht nur vereinfacht dargestellt: (a) Es wurden keine möglichen Veränderungen der natürlichen, langfristigen Klimavariabilität, oder der Jahr-zu-Jahr-Variabilität des Wetters berücksichtigt.

Eine mögliche Verbesserung unserer Methodik könnte darin bestehen, zusätzliche stochastische Modelle auf den entsprechenden Zeitskalen einzuführen. In diesem Zusammenhang könnten die in den monatlichen Szenarien vorgegebenen Veränderungen der Tag-zu-Tag Variabilität (siehe Anhang D) dazu verwendet werden, um auf zugehörige Veränderungen der Jahr-zu-Jahr Variabilität des Wetters zu schliessen (siehe z.B. Katz, 1993; Bo *et al.*, 1994). (b) Der Wettergenerator reproduziert auf der täglichen und der stündlichen Zeitskala nur die *mittlere* Variabilität des Wetters. So wurden einerseits die Persistenz stündlicher und täglicher Wetterlagen und andererseits abrupte Wetterumschwünge zu wenig ausgeprägt dargestellt (Fig. 85). Eine verbesserte Darstellung der Persistenz könnte durch die Berücksichtigung höherer Terme der Autokorrelationsfunktionen der Wettervariablen, oder durch die explizite Einführung mehrtägiger *Wellen* (entsprechend des Andauerns von Wetterlagen) erreicht werden (z.B. Woo, 1992). Abrupte Umstellungen des lokalen Wetters, wie sie z.B. bei den *Eisheiligen* (ca. in der 2. Maiwoche) oder der "Schafskälte" (ca. Mitte Juni) systematisch aufzutreten pflegen, gehen oft mit entsprechend plötzlichen Umstellungen in der globalen Zirkulation einher (z.B. Kalnicky, 1987), so dass deren korrekte Darstellung eine Ankopplung des Wettergenerators am täglichen atmosphärischen Zustand voraussetzen würde. (c) Die simulierten Verteilungen der stündlichen (Fig. 85) und täglichen (Fig. 86) Niederschlagssummen, sowie die langjährigen Schwankungsbreiten einiger stündlicher Wettervariablen (Fig. 84) zeigten zum Teil grössere Abweichungen von den gemessenen Verteilungen. Eine Verbesserung wäre für den Niederschlag durch die Benutzung von Gamma- anstatt von Exponential-Verteilungen möglich. Für die anderen Variablen wäre die Vorhersage der stündlichen Erwartungswerte der Tageszyklen aus den jeweiligen täglichen Variablen zu verbessern.

(3) *Beschränkte räumliche Konsistenz*: Die Anwendung der vorgeschlagenen Methodik auf mehr als einen Standort ergibt nur auf der monatlichen Zeitskala räumlich konsistente Wetterszenarien. Um räumliche Konsistenz auf der täglichen oder stündlichen Zeitskala zu garantieren müssten zusätzlich die statistischen Beziehungen zwischen den täglichen und stündlichen Witterungen verschiedener Standorte berücksichtigt werden. Dies könnte entweder rein regional (z.B. Wilks, 1989b; Zucchini & Guttorp, 1991), oder in Abhängigkeit des grossräumigen atmosphärischen Zustands (z.B. Bardossy & Plate, 1992; Hughes & Guttorp, 1994) bewerkstelligt werden.

(4) *Datenverfügbarkeit*: Die Anwendbarkeit unserer Methodik hängt von der Verfügbarkeit entsprechender Datensätze zur Ermittlung der statistischen Modelle ab. Für die Regionalisierungsprozedur werden mindestens 30-50 Jahre grossräumiger und lokaler Daten mit einer monatlichen Auflösung benötigt, während für die Anpassung des Wettergenerators einige (ca. 5-10) Jahre lokaler

Daten mit einer stündlichen Auflösung vorliegen müssen. Das Problem der Verfügbarkeit lokaler Messdaten kann jedoch durch die Verwendung räumlicher Interpolations-Prozeduren (z.B. Fischlin & Gyalistras, 1996b) teilweise entschärft werden.

Im Zusammenhang mit der Fallstudie sind die folgenden spezifischen Probleme zu erwähnen:

Für mehrere monatliche Variablen, wie z.B. die Niederschlagssummen der Sommermonate oder die innermonatlichen Standardabweichungen verschiedener täglicher Variablen, wurden nur sehr schwache Korrelationen mit dem grossräumigen atmosphärischen Zustand gefunden (siehe auch Gyalistras *et al.*, 1994). Dies führte zu grossen Unsicherheiten in den Parametern der Regionalisierungsprozedur und somit auch in den erhaltenen lokalen Veränderungen. Diese Unsicherheiten lassen sich jedoch mindestens näherungsweise quantifizieren. Gyalistras (1994; siehe auch Gyalistras & Fischlin, 1995) benutzte hierzu eine empirische *Bootstrap*-Prozedur (z.B. DiCiccio & Tibishrani, 1987) und erhielt unter verschiedenen GCM-Szenarien z.B. für die hypothetischen neuen Erwartungswerte der annuell und über 40 Schweizerische Standorte gemittelten Temperatur 90% Konfidenzintervalle von ca. ± 0.5 °C. Für den gebietsmittleren Niederschlag wurde eine mittlere Spannbreite von ca. $\pm 20\%$ (in % des jeweiligen neuen Erwartungswertes) erhalten. Für einzelne Monate und Standorte ergaben sich teilweise um ein Vielfaches grössere Konfidenzintervalle.

Zusätzliche Unsicherheiten traten in den Klimaszenarien im Zusammenhang mit der hohen Jahr-zu-Jahr Variabilität des globalen und lokalen Klimas auf. Insbesondere standen zur Definition der grossräumigen Klimaänderung nur eine beschränkte Anzahl simulierter Jahre unter heutigen und möglichen zukünftigen Bedingungen zur Verfügung (siehe Abschnitt über Daten). Beim CCC-Szenario (5 Simulationsjahre), betrug gemäss einer groben Abschätzung ($\pm 1.65 \sigma / \sqrt{n}$, wobei σ aus den heutigen Messungen berechnet wurde) die zusätzlichen Unsicherheiten für die monatsmittleren Temperaturen im Mittel über alle Monate ca. 1.2 °C und für die monatlichen Niederschlagssummen ca. 40% (in % des jeweils neuen monatlichen Erwartungswertes). Für das ECHAM-Szenario ergaben sich mit 20 Simulationsjahren jeweils nur halb so grosse Werte.

Für die Erwartungswerte einzelner monatlicher Variablen wurden in den Szenarien schliesslich einige sehr grosse Veränderungen erhalten, die besonders fragwürdig erscheinen: So ergab sich z.B. im September für beide GCM-Simulationen und Standorte ein starker Anstieg des Niederschlags (Fig. 88), der in allen Fällen durch das grossräumige Temperatursignal bewirkt wurde. Da die in den GCMs simulierte Erwärmung die Spannbreite der grossräumigen Mes-

sungen übertraf, die zur Ermittlung der Regionalisierungsprozedur zur Verfügung standen, könnte der erhaltene Anstieg das Resultat einer ungültigen Extrapolation sein. Allerdings ist es auch möglich, dass die Szenarien mindestens qualitativ richtig sind: Unter der bereits weiter oben erwähnten Annahme, dass die relative Feuchtigkeit der Atmosphäre in einem wärmeren Klima ungefähr konstant bleibt, könnte die Zufuhr insgesamt feuchterer Luftmassen nach den Alpen durchaus beträchtliche Niederschlags-zunahmen zur Folge haben (siehe auch das Modellexperiment von Schär *et al.*, 1996).

Sehr grosse Erhöhungen wurden auch für die monatlichen Windgeschwindigkeiten, vor allem während des Sommers, erhalten (Fig. 88). Der Grund lag in einer positiven Korrelation der lokalen Messungen mit der Temperaturverteilung über dem Kontinent. Dieser physikalisch fragwürdige Zusammenhang auf einen langjährigen Trend in den lokalen Messreihen zurück, der unter Umständen lediglich Inhomogenitäten (z.B. Beobachterwechsel, siehe Abschnitt über Material & Methoden) denn eine echte vergangene Veränderung widerspiegeln könnte. Andererseits lässt sich mindestens spekulieren, dass unter einer globalen Erwärmung die regionalen Windsysteme (siehe den ausgeprägten Tageszyklus in Figs. 84 und 89) insgesamt verstärkt werden könnten.

Diese Ausführungen unterstreichen abermals, dass die aufgrund der Szenarien erhaltenen Abschätzungen möglicher Auswirkungen einer zukünftigen Klimaänderung auf z.B. das Grünland mit grosser Vorsicht zu interpretieren sind. Die Szenarien sollten vor allem als Ausgangspunkte für weiterreichende Sensitivitätsanalysen verstanden werden, anhand derer insbesondere der Einfluss besonders unsicherer Grössen (wie des Niederschlags oder des Windes) näher untersucht werden sollte. Um dem weiten Spektrum potentieller zukünftiger Klimata besser gerecht zu werden, sollten zudem noch weitere, auf alternative Ausgangsannahmen oder GCMs basierende Szenarien, verwendet werden.

9.5 Schlussfolgerungen

9.5.1 Gesamtmethodik

Eine neue Methodik zur Herleitung stündlicher Wetterszenarien aus Klimasimulationen mit globalen Zirkulationsmodellen (GCMs) wurde vorgestellt und getestet. Die Methodik beruht auf die Kombination einer empirischen Regionalisierungsprozedur mit einem neu entwickelten lokalen stochastischen Wettergenerator, der durch monatliche Wettervariablen angetrieben wird. Die Regionalisierungsprozedur dient dazu, um aus einer vorgegebenen grossräumigen Klimaänderung auf mögliche zugehörige Veränderungen lokaler monatlicher Wettervariablen zu schliessen, während der Wettergenerator den Übergang vom monatlichen zum stündlichen Wetter bewerkstelligt.

Die Güte der vom Wettergenerator erzeugten Wetterverläufe wurde unter Verwendung unabhängiger Datenreihen (Periode 1986-1994) an zwei repräsentativen Klimastationen (Bern-Liebefeld und La Chaux-de-Fonds) getestet. Der Vergleich der statistischen Eigenschaften der gemessenen und der stochastisch simulierten Wettervariablen ergab die folgenden Ergebnisse:

- Die langjährigen Erwartungswerte und die Jahr-zu-Jahr Variabilität der 22 monatlichen Eingangsvariablen, mit welchen der Wettergenerator angetrieben wurde, wurden definitionsgemäss mit hoher Genauigkeit reproduziert.
- Die Wahrscheinlichkeiten für Stunden mit Niederschlag wurden leicht über-, die Wahrscheinlichkeiten von Tagen mit Niederschlag leicht unterschätzt. Die Übergangswahrscheinlichkeiten zwischen trockenen und feuchten Tagen und Stunden, bzw. die mittleren Längen von Trocken- und Feuchtperioden, wurden in den meisten Fällen mit kleinen Abweichungen wiedergegeben.
- Die langjährigen Verteilungen der täglichen und der stündlichen Niederschlagssummen wurden qualitativ richtig simuliert. Die relativen Häufigkeiten der sehr kleinen stündlichen Niederschlagssummen wurden jedoch systematisch über-, diejenigen der sehr kleinen und der sehr grossen täglichen Niederschlagssummen hingegen systematisch unterschätzt.
- Die langjährigen Verteilungen der Tages- und Stundenmittel der Globalstrahlung, sowie der Tagesmittel, Tagesextrema und Stundenmittel der Temperatur, des Dampfdrucks und der Windgeschwindigkeit wurden gut wiedergegeben.
- Die langjährig mittleren Kreuzkorrelationskoeffizienten zwischen den verschiedenen täglichen und stündlichen Wettervariablen wurden in der Regel sehr gut reproduziert.
- Die täglichen und stündlichen Autokorrelationskoeffizienten, sowie die Variabilität der Stundenmittel der Windgeschwindigkeit wurden meistens unterschätzt, während die relativen Häufigkeiten von Stunden mit hoher mittlerer Globalstrahlung in der Regel systematisch überschätzt wurden.
- Für die langjährigen Extremwerte verschiedener täglicher und stündlicher Wettervariablen wurden zum Teil grössere Abweichungen gefunden.

In einem zweiten Schritt wurde das REGÖK-Simulationsmodell für die Jahre 1981-1994 sowohl mit gemessenen als auch mit simulierten stündlichen Wettereingangsdaten angetrieben. Im Mittel über alle Jahre der Testperiode und die

beiden Standorte Bern-Liebefeld und La Chaux-de-Fonds wurden die folgenden Ergebnisse erhalten:

- Die Jahreserträge wurden mit einem mittleren Fehler von +2.2% und einem mittleren absoluten Fehler von +2.9% reproduziert. Für die Summen der Evapotranspiration in der Vegetationsperiode betragen der mittlere Fehler -0.2% und der mittlere absolute Fehler +3.1%.
- Die Jahr-zu-Jahr Schwankungen der Jahreserträge und der Summen der Evapotranspiration in der Vegetationsperiode betragen im Mittel über die zwei Standorte ca. $\pm 10\%$ bzw. $\pm 12\%$ und wurden mit mittleren Korrelationskoeffizienten von 0.83 bzw. 0.89 ebenfalls gut wiedergegeben.

Die vorgeschlagene Methodik besitzt einige Nachteile, die teilweise in den bestehenden Methoden zur Generierung von Wetterszenarien ebenfalls aufzutreten pflegen. Erstens sind alle erhaltenen Resultate nur unter der kritischen Annahme gültig, dass die für das heutige Klima ermittelten statistischen Zusammenhänge zwischen dem grossräumigen und dem lokalen Klima unter einem zukünftigem Klima weiterhin gültig bleiben. Zweitens gilt die analoge Annahme für den Anwendungsbereich der verschiedenen statistischen Modelle, die zur Simulation der täglichen und der stündlichen Wettervariablen benötigt werden. Drittens wird die Variabilität des Wetters innerhalb eines Monats oder Tages nur vereinfacht dargestellt, so dass sowohl relativ langsame, sich über viele Tage hinziehende Schwankungen des Wetters, als auch sehr plötzliche Umstellungen zwischen Wetterlagen, bzw. mögliche Veränderungen in den Charakteristika abrupter Wetterumschwünge unter einem geänderten Klima, nur beschränkt wiedergegeben werden.

Diese Nachteile werden jedoch durch eine Reihe wesentlicher Vorteile aufgewogen. Die vorgeschlagene Methodik ist flexibel, allgemein verwendbar, ermöglicht eine sehr hohe räumliche Auflösung, und garantiert Konsistenz mit Messungen des lokalen Wetters und Klimas. Ferner kann – anders als dies mit bestehenden Wettergeneratoren bisher möglich gewesen ist – die Qualität der simulierten Wetterverläufe für individuelle Monate bzw. Jahre einfach getestet werden. Die Methodik hat auch einen vergleichsweise geringen Bedarf an grossräumigen und lokalen Daten, stellt relativ geringe Ansprüche an die Qualität der Eingangsdaten seitens der Klimamodelle, und ist mit einem verhältnismässig geringen Rechenaufwand verbunden. All dies ermöglicht eine ausführliche Analyse der Sensitivität von Klimawirkungs-Modellen auf Unsicherheiten in den Klima- und Wetterszenarien. Der Wettergenerator kann schliesslich auch unabhängig von GCMs benutzt werden, z.B. um mit willkürlich vorgegebenen monatlichen Szenarien zu experimentieren, oder aus täglichen Messreihen stündliche Wetterverläufe zu interpolieren.

Aufgrund dieser Eigenschaften, sowie der Resultate, die aus der Verifikation des stochastischen Wettergenerators unter heutigen Klimabedingungen erhalten wurden, kamen wir zum Schluss dass sich die Methodik für die vorliegende Studie, möglicherweise aber auch für weitere (z.B. ackerbauliche oder hydrologische) Anwendungen, gut eignet.

9.5.2 Fallstudie REGÖK

Der Vergleich der an den experimentellen REGÖK-Standorten Ostermündigen und Oberbütschel gemessenen monatsmittleren Temperaturen und Niederschläge mit Messungen aus einer grossen Anzahl von Klimastationen in der Nähe und innerhalb des Schweizerischen Mittellandes zeigte, dass die langjährigen Klimastationen Bern-Liebefeld und La Chaux-de-Fonds als einigermaßen repräsentativ für die experimentellen Standorte, bzw. für verschiedene Höhenlagen des Schweizerischen Mittellandes, angesehen werden können. Die Wahl dieser zwei Klimastationen zur Herleitung der Klima- und Wetterszenarien stellte einen Kompromiss zwischen einer genügend grosser Ähnlichkeit der Klimata der Klimastationen mit jenen der experimentellen Standorte einerseits und dem Bedarf nach genügend langen Messreihen andererseits dar. Die an den beiden Klimastationen für die Jahre 1993 und 1994 simulierten Jahreserträge wichen in Bern-Liebefeld im Mittel um -6.7%, in La Chaux-de-Fonds um -3.3% von den an den eigentlichen, experimentellen Standorten ermittelten Werten ab. Für die Summen der Evapotranspiration in der Vegetationsperiode betragen die mittleren Abweichungen +5.8% bzw. -15.9%.

Mittels der statistischen Regionalisierungsprozedur von Gyalistras *et al.* (1994) wurden aus zwei globalen $2\times\text{CO}_2$ Klimaänderungs-Simulationen mit dem ECHAM1/LSG-GCM (Cubasch *et al.*, 1992) und dem CCC-GCMII (Boer *et al.*, 1992) zwei plausible und räumlich konsistente Szenarien für mögliche zukünftige Veränderungen in den Erwartungswerten 22 monatlicher Wettervariablen in Bern-Liebefeld und La Chaux-de-Fonds hergeleitet. Die Szenarien unterschieden sich grundsätzlich in der Stärke der Klimaänderung und zeigten je nach Variable teilweise eine starke Abhängigkeit von der Jahreszeit und dem Ort. Allerdings zeigten sie auch eine insgesamt ähnliche Form der Klimaänderung. Im Mittel über die beiden Standorte und die Monate März bis Oktober wurden die folgenden Veränderungen relativ zu den aus der Periode 1901-1980 geschätzten Erwartungswerten erhalten:

- Die monatlichen Niederschlagswahrscheinlichkeiten nahmen unter dem ECHAM- als auch unter dem CCC-Szenario im Schnitt um -4.6% bzw. -4.3% ab.
- Die Niederschlagssummen änderten im Mittel um -1.6% (ECHAM), bzw. +5.5% (CCC).

- Die Tagesmittel der Globalstrahlung nahmen um +3.1% bzw. +4.8% zu.
- Die Temperaturmaxima stiegen um +1.8 °C bzw. +3.0 °C, während sich die Temperaturmittel um +1.6 °C bzw. +2.7 °C und die Temperaturminima nur um +1.5 °C bzw. +2.6 °C erwärmten.
- Die Tagesmittel und -extrema des Dampfdrucks stiegen ebenfalls in beiden Szenarien, durchschnittlich um ca. +10.4% bzw. +18.6%.
- Für die Tagesmittel und -extrema der Windgeschwindigkeiten wurden mittlere Erhöhungen zwischen +4.2% und +15.1%, bzw. +29.6% und +44.0% erhalten.
- Die innermonatlichen Standardabweichungen der tagesmittleren und -extremen Temperaturen nahmen im Schnitt über die verschiedenen Monate um -2.2% bis -3.8%, bzw. -3.3% bis -6.4% ab.
- Die Standardabweichungen der Tagesmittel und -extrema des Dampfdrucks nahmen im Mittel um +4.0% bis +5.3%, bzw. um +8.6% bis +11.7% zu.
- Für die innermonatlichen Standardabweichungen der täglichen Globalstrahlung, sowie der Tagesmittel- und -extrema der Windgeschwindigkeit wurden in beiden Szenarien keine einheitlichen Veränderungen erhalten.

Die beiden verwendeten GCM-Simulationen deckten ungefähr den heute als möglich erachteten Bereich für eine globale Klimaänderung aufgrund einer Verdoppelung des atmosphärischen CO₂-Gehaltes ab. Die in den Szenarien dargestellten Veränderungen könnten unter der Annahme eines *non-intervention*-Szenarios für die Emmission von Treibhausgasen (Houghton *et al.*, 1994) ca. im zweiten Drittel des nächsten Jahrhunderts durchlaufen werden. Ein genauer Zeitpunkt kann jedoch selbst bei Vorgabe eines bestimmten Szenarios für zukünftige Emmissionen von Treibhausgasen aufgrund weiterer Unsicherheiten (z.B. aufgrund der natürlichen Variabilität des Klimas und der dämpfenden Wirkung von Aerosolen) nicht angegeben werden.

Aus Gründen des oben erwähnten ungenauen Zeitpunktes, sowie aufgrund von teilweise grossen Unsicherheiten bei der Regionalisierung der globalen Klimaänderungen, sind die resultierenden Szenarien nicht als Prognosen zu verstehen; sie stellen lediglich Abschätzungen über mögliche lokale Veränderungen in Klimata und Witterung dar, wie sie unter den zwei ausgewählten Simulationen einer globalen Klimaänderung eintreten könnten. Die Szenarien sollten somit vor allem als Ausgangspunkte für weiterreichende Sensitivitätsstudien dienen. In diesen sollten insbesondere die Auswirkungen alternativer Veränderungsmuster für besonders unsichere Eingangsgrössen, wie z.B. den Niederschlag oder den Wind, untersucht werden.

Trotz der vielen beteiligten Unsicherheiten bieten nach unserer Meinung die hier vorgestellten Szenarien dank ihrer *Realitätsnähe* und internen Konsistenz einen guten Ausgangspunkt, um mithilfe des REGÖK-Simulationsmodells an einzelnen Standorten Abschätzungen über mögliche Veränderungen in Wiesen des Schweizerischen Mittellandes, sowie einen Einblick in die dabei beteiligten Mechanismen zu erhalten. Um flächendeckende, quantitative Aussagen für das gesamte Mittelland, oder gar andere Regionen zu erhalten, wären jedoch weitere Untersuchungen nötig. Aus klimatologischer Sicht scheinen diese aufgrund der hier vorgeschlagenen, flexiblen Gesamtmethodik, die sich zudem gut mit einer Prozedur zur räumlichen Interpolation von Klimaparametern kombinieren liesse (z.B. Gyalistras & Fischlin, 1996b), ohne weiteres möglich.

9.6 Verdankung

Unser besonderer Dank gilt der Leitung des Nationalen Forschungsprogramms NFP-31 für die Förderung der vorliegenden Arbeit mit einem Zusatzkredit. Forschung durch DG wurde vom Schweizerischen Schwerpunktprogramm Umwelt, Kredit-Nr. 5001-036812, unterstützt. Wir bedanken uns bei Herrn H. Bantle von der Schweizerischen Meteorologischen Anstalt (SMA), Zürich, für seine freundlichen Auskünfte bezüglich Qualität und Verfügbarkeit von Wetterdaten. Für den Zugang an globale atmosphärische Datensätze, sowie an Simulationsresultate des ECHAM1/ LSG-GCMs möchten wir uns bei H. von Storch, I. Jessel und U. Cubasch vom Max-Planck-Institut für Meteorologie, Hamburg, bedanken. F. Zwiers und S. Lambert vom Canadian Climate Centre, Ontario, gilt unser Dank für die Simulationsresultate des CCC-GCMII. Schliesslich möchten wir uns ganz allgemein bei der SMA für den freien Zugang zu den verschiedenen lokalen Wetterdaten, ohne welche die vorliegende Arbeit nicht möglich gewesen wäre, bedanken.

9.7 Literatur

- Aguiar, R.J. & Collares-Pereira, M. (1992). TAG: a time dependent, autoregressive, Gaussian model for generating synthetic hourly radiation. *Sol. Energ.*, 49(3): 167-174.
- Aguiar, R.J., Collares-Pereira, M. & Conde, J.P. (1988). Simple procedure for generating sequences of daily radiation values using a library of Markov transition matrices. *Sol. Energ.*, 40(3): 269-279.¹
- Balling, R.C. (1984). Classification in climatology. In: Gaile, G.L. & Willmott, C.J. (eds.), *Spatial statistics and models*, Dordrecht a.o.: Reidel, pp. 81-108.
- Bantle, H. (1989). Programmdokumentation Klima-Datenbank am RZ-ETH Zürich. SMA Tech. Report Schweiz. Meteorol. Anstalt, Zürich, Switzerland, 8 pp.
- Bantle, H. (1993). Benutzeranleitung zur Datenbank ENAD. SMA Tech. Report Schweiz. Meteorol. Anstalt, Zürich, Switzerland, 10 pp.
- Bardossy, A. & Plate, E.J. (1992). Space-time model for daily rainfall using atmospheric circulation patterns. *Water Resour. Res.*, 28(5): 1247-1259.

- Barnett, T. & Preisendorfer, R. (1987). Origins and levels of monthly and seasonal forecast skills for the United States surface air temperatures determined by canonical correlation analysis. *Mon. Wea. Rev.*, 115: 1825-1850.
- Beniston, M., Ohmura, A., Rotach, M., Tschuck, P., Wild, M. & Marinucci, R.M. (1995). Simulation of climate trends over the alpine region - Development of a physically-based modeling system for application to regional studies of current and future climate. Final Scientific Report to the Swiss National Science Foundation 4031-33250, Department of Geography, Swiss Federal Institute of Technology (ETH), Zurich, Switzerland, 198 pp.
- Bo, Z., Islam, S. & Eltahir, E.A.B. (1994). Aggregation-disaggregation properties of a stochastic rainfall model. *Water Resour. Res.*, 30(12): 3423-3435.
- Boer, G.J., McFarlane, N.A. & Lazare, M. (1992). Greenhouse gas-induced climate change simulated with the CCC second-generation general circulation model. *J. Clim.*, 5: 1045-1077.
- Box, G.E.P. & Jenkins, G.M. (1976). *Time series analysis: forecasting and control*. Holden-Day: San Francisco a.o., 575 pp.
- Briffa, K.R. & Jones, P.D. (1993). Global surface air temperature variations during the twentieth century - Part 2: implications for large-scale, high-frequency paleoclimatic studies. *The Holocene*, 3: 77-88.
- Burlando, P. & Rosso, R. (1991). Extreme storm rainfall and climatic change. *Atmosph. Res.* 27: 169-189.
- Carter, T.R., Parry, M.L., Harasawa, H. & Nishioka, S. (1994). IPCC technical guidelines for assessing climate change impacts and adaptations. Dep. of Geography, Univ. College London, National Institute for Environmental Studies, Japan: London, Tsukuba, 59 pp.
- Corte-Real, J., Zhang, X. & Wang, X. (1995). Downscaling GCM information to regional scales: a non-parametric multivariate regression approach. *Clim. Dyn.*, 11: 413-424.
- Cowpertwait, P.S.P. (1991). Further developments of the Neymann-Scott clustered point process for modeling rainfall. *Water Resour. Res.*, 27(7): 1431-1438.
- Cress, A., Davies, H.C., Frei, C., Lüthi, D. & Schär, C. (1994). Regional climate simulations in the Alpine region. LAPETH Report 32, Atmospheric Physics ETH, Zürich, 134 pp.
- Cubasch, U. et al. (1992). Time-dependent greenhouse warming computations with a coupled ocean-atmosphere model. *Clim. Dyn.*, 8(55): 55-69.
- Cubasch, U. et al. (1995). A climate change simulation starting from 1935. *Clim. Dyn.*, 11: 71-84.
- DiCiccio, T. & Tibshirani, R. (1987). Bootstrap confidence intervals and bootstrap approximations. *J. Am. Stat. Assoc.*, 82: 163-170.
- Fischlin, A. & Schaufelberger, W. (1987). Arbeitsplatzrechner im technisch-naturwissenschaftlichen Hochschulunterricht. *Bulletin SEV/VSE*, 78(1): 15-21.
- Fischlin, A. & Gyalistras, D. (1996). Assessing impacts of climatic change on forests in the Alps. *Global Ecol. Biogeogr. Lett.*: submitted.
- Foufoula-Georgiou, E. & Lettenmaier, D.P. (1987). A Markov renewal model for rainfall occurrences. *Water Resour. Res.*, 23: 875-884.
- Frey-Buness, A. (1993). Ein statistisch-dynamisches Verfahren zur Regionalisierung globaler Klimasimulationen. Forschungsbericht DLR FB 93-47, Deutsche Forschungsanstalt für Luft- und Raumfahrt, Oberpfaffenhofen, Germany, 149 pp.
- Frey-Buness, A., Heimann, D. & Sausen, R. (1995). A statistical-dynamical downscaling procedure for global climate change simulations. *Theoretical and Applied Climatology*, 50(3): 117-131.
- Gardner, W.A. (ed.) (1994). *Cyclostationarity in communications and signal processing*, IEEE, New York, 493 pp.
- Gates, W.L., Mitchell, J.F.B., Boer, G.J., Cubasch, U. & Meleshko, V.P. (1992). Climate modelling, climate prediction and model validation. In: Houghton, J.T., Callander, B.A. & Varney, S.K. (eds.), *Climate change 1992 - the supplementary report to the IPCC scientific assessment*, Cambridge a.o.: Cambridge Univ. Press, pp. 96-134.
- Gates, W.L., Rowntree, P.R. & Zeng, Q.-C. (1990). Validation of climate models. In: Houghton, J.T., Jenkins, G.J. & Ephraums, J.J. (eds.), *Climate change - the IPCC scientific assessment*, Cambridge a.o.: Report prepared for IPCC by Working Group 1. Cambridge Univ. Press, pp. 99-137.
- Geng, S., Penning de Vries, F.W.T. & Supit, I. (1985a). Analysis and simulation of weather variables - Part I: rain and wind in Wageningen. 4, Centre for Agrobiological Research, Agricultural University, Wageningen, The Netherlands.
- Geng, S., Penning de Vries, F.W.T. & Supit, I. (1985b). Analysis and simulation of weather variables - Part II: temperature and solar radiation. 5, Centre for Agrobiological Research, Agricultural University, Wageningen, The Netherlands.

- Geng, S., Penning de Vries, F.W.T. & Supit, I. (1986). A simple method for generating daily rainfall data. *Agric. For. Meteorol.*, 36: 363-376.
- Giorgi, F., Bates, G.T. & Nieman, S.J. (1993). The multiyear surface climatology of a regional atmospheric model over the Western United States. *J. Clim.*, 6: 75-95.
- Giorgi, F., Marinucci, M.R. & Visconti, G. (1992). A 2xCO₂ climate change scenario over Europe generated using a limited area model nested in a General Circulation model - Part II: climate change scenario. *J. Geophys. Res. D*, 97(D9): 10011-10028.
- Giorgi, F. & Mearns, L.O. (1991). Approaches to the simulation of regional climate change: a review. *Rev. Geophys.*, 29(2): 191-216.
- Graham, V.A., Hollands, K.G.T. & Unny, T.E. (1988). A time series model for Kt with application to global synthetic weather generation. *Sol. Energ.*, 40(2): 83-92.
- Gregory, J.M., Wigley, T.M.L. & Jones, P.D. (1992). Determining and interpreting the order of a two-state Markov-chain: application to models of daily precipitation. *Water Resour. Res.*, 28(5): 1443-1446.
- Gregory, J.M., Wigley, T.M.L. & Jones, P.D. (1993). Application of Markov models to area-average daily precipitation series and interannual variability in seasonal totals. *Clim. Dyn.*, 8: 299-310.
- Grotch, S.L. & MacCracken, M.C. (1991). The use of general circulation models to predict regional climate change. *J. Clim.*, 4: 286-303.
- Gyalistras, D., von Storch, H., Fischlin, A. & Beniston, M. (1994). Linking GCM-simulated climatic changes to ecosystem models: case studies of statistical downscaling in the Alps. *Clim. Res.*, 4(3): 167-189.
- Gyalistras, D. (1994). Case studies in bioclimatic scenario derivation. Zwischenbericht Nr. 2/94 an den Schweiz. Nationalfonds zur Förderung der Naturwiss. Forschung Systems Ecology ETHZ, Zürich, 8 pp.
- Gyalistras, D. & Fischlin, A. (1995). Downscaling - Applications to ecosystems modeling. In: Muirterchaigh, I. (ed.), *Proceedings of the 6th Internat. Meeting on Statistical Climatology*, Galway, Ireland, Univ. College: Galway, pp. 189-192.
- Gyalistras, D. & Fischlin, A. (1996a). WeathGen: a hourly weather generator for climate change studies. Systems Ecology Report Swiss Federal Institute of Technology ETHZ, Zürich, in prep.
- Gyalistras, D. & Fischlin, A. (1996b). Derivation of climate change scenarios for mountainous ecosystems: a GCM-based method and the case study of Valais, Switzerland. Systems Ecology Report 22, Swiss Federal Institute of Technology ETHZ, Zürich, 38 pp.
- Gyalistras, D., Schär, C., Davies, H.C. & Wanner, H. (1997). Future Alpine climate. In: Cebon, P., Dahinden, U., Davies, H.C., Imboden, D. & C., J. (eds.), *Regional perspectives on climate change: a view from the Alps*, Cambridge, Massachusetts a.o.: MIT Press, accepted.
- Hasselmann, K. (1990). How well can we predict the climate crisis? MPI Report 57, Max-Planck-Institut für Meteorologie, Hamburg.
- Hasselmann, K. & Barnett, T.P. (1981). Techniques of linear prediction for systems with periodic statistics. *J. Atmos. Sci.*, 38: 2275-2283.
- Henderson-Sellers, A. & McGuffie, K. (1987). *A climate modelling primer*. John Wiley & Sons: Chichester, 217 pp.
- Hewitson, B. (1994). Regional climates in the GISS General Circulation Model: air surface temperature. *J. Clim.*, 7: 283-303.
- Hopkins, T. & Phillips, C. (1988). *Numerical methods in practice: using the NAG Library*. Addison-Wesley: Wokingham, England a.o., 308 pp.
- Houghton, J.T., Jenkins, G.J. & Ephraums, J.J. (eds.) (1990). *Climate change: the IPCC scientific assessment*, Cambridge Univ. Press, Cambridge, UK, 364 pp.
- Houghton, J.T., Callander, B.A. & Varney, S.K. (eds.) (1992). *Climate change 1992: the supplementary report to the IPCC scientific assessment*, Cambridge Univ. Press, Cambridge, UK, 200 pp.
- Houghton, J. et al. (eds.) (1994). *Climate change 1994: radiative forcing of climate change and an evaluation of the IPCC 1992 IS92 emission scenarios*, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 339 pp.
- Hughes, J.P. & Guttorp, P. (1994). A class of stochastic models for relating synoptic atmospheric patterns to regional phenomena. *Water Resour. Res.*, 30(5): 1535-1546.
- Hulme, M., Briffa, K.R., Jones, P.D. & Senior, C.A. (1993). Validation of GCM control simulations using indices of daily airflow types over the British Isles. *Clim. Dyn.*, 9: 95-105.
- Jain, S. & Jain, P.C. (1988). A comparison of the Angstrom-type correlations and the estimation of monthly average daily global irradiation. *Sol. Energ.*, 40(2): 93-98.
- Jessel, I. (1991). Inventory of available observed data sets. DKRZ Report 1, Deutsches Klimarechenzentrum, Hamburg.

- Jones, P.D. & Briffa, K.R. (1992). Global surface air temperature variations during the twentieth century - Part 1: spatial, temporal and seasonal details. *The Holocene*, 2: 165-179.
- Jones, R.G., Murphy, J.M. & Nogier, M. (1995). Simulation of climate change over Europe using a nested regional climate model. I: Assessment of control climate, including sensitivity to location of lateral boundaries. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 121: 1413-1449.
- Kalnicky, R.A. (1987). Seasons, singularities, and climatic changes over the midlatitudes of the Northern Hemisphere during 1899-1969. *J. Clim. Appl. Met.*, 26(11): 1496-1510.
- Katz, R.W. (1993). Towards a statistical paradigm for climate change. *Clim. Res.*, 2: 167-175.
- Katz, R.W. (1996). Use of stochastic models to generate climate change scenarios. *Clim. Change*, 32(3): 237-255.
- Kavvas, M.L. & Delleur, J.W. (1981). A stochastic cluster model of daily rainfall sequences. *Water Resour. Res.*, 17(4): 1151-1160.
- Lamb, P.J. (1987). On the development of regional climatic scenarios for policy-orientated climatic-impact assessment. *Bull. Amer. Met. Soc.*, 68: 1116-1123.
- Marinucci, M.R., Giorgi, F., Beniston, M., Wild, M., Tschuck, P. & Bernasconi, A. (1995). High resolution simulations of January and July climate over the Western Alpine region with a nested regional modeling system. *Theoretical and Applied Climatology*, 51: 119-138.
- Matyasovszky, I. & Bogardi, I. (1994). Comparison of two general circulation models to downscale temperature and precipitation under climate change. *Water Resour. Res.*, 30(12): 3437-3448.
- McFarlane, N.A., Boer, G.J., Blanchet, J.-P. & Lazare, M. (1992). The Canadian Climate Centre second-generation general circulation model and its equilibrium climate. *J. Clim.*, 5: 1013-1044.
- Mearns, L.O., Giorgi, F., McDaniel, L. & Shields, C. (1995). Analysis of variability and diurnal range of daily temperature in a nested regional climate model: comparison with observations and doubled CO₂ results. *Clim. Dyn.* 11(4): 193-209.
- Mitchell, J.F.B. & Ingram, W.J. (1992). On CO₂ and climate: mechanisms of changes in clouds. *J. Clim.*, 5: 5-21.
- Mitchell, J.F.B., Johns, T.C., Gregory, J.M. & Tett, S.F.B. (1995). Climate responses to increasing levels of greenhouse gases and sulphate aerosols. *Nature*, 376: 501-504.
- Nonhebel, S. (1994a). Inaccuracies in weather data and their effects on crop growth simulation results - I. Potential production. *Clim. Res.*, 4(1): 47-60.
- Nonhebel, S. (1994b). Inaccuracies in weather data and their effects on crop growth simulation results - II. Water-limited production. *Clim. Res.*, 4(1): 61-74.
- Pittock, A.B. (1993). Climate scenario development. In: Jakeman, A.J., Beck, M.B. & McAleer, M.J. (eds.), *Modelling change in environmental systems*, Chichester a.o.: Wiley, pp. 481-503.
- Richardson, C.W. (1981). Stochastic simulation of daily precipitation, temperature, and solar radiation. *Water Resour. Res.*, 17(1): 182-190.
- Robinson & Finkelstein (1991). The development of impact-oriented climate scenarios. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 72(4): 481-490.
- Robock, A. et al. (1993). Use of general circulation model output in the creation of climate change scenarios for impact analysis. *Clim. Change*, 23: 293-335.
- Schär, C., Frei, C., Lüthi, D. & Davies, H.C. (1996). Surrogate climatic change scenarios for regional climate models. *Geophys. Res. Lett.*: in press.
- Schneider, H. & Barker, G.P. (1968). *Matrices and linear algebra*. Holt, Rinehart & Winston: New York.
- Semtner, A.J. (1995). Modeling ocean circulation. *Science*, 269: 1379-1385.
- Thöny, J., Fischlin, A. & Gyalistras, D. (1994). RASS: Towards bridging the gap between interactive and off-line simulations. In: Halin, J., Karplus, W. & Rimane, R. (eds.), *CISS - First Joint Conference of International Simulation Societies Proceedings*, August 22-25, 1994, ETH Zuerich, Society for Computer Simulation International, San Diego, pp. 99-103.
- Viner, E. & Hulme, P. (1993). The climate impacts LINK project: Providing climate change scenarios for impacts assessment in the UK. Report prepared for the UK Department of the Environment Climatic Research Unit, Norwich, 24 pp.
- von Storch, H., Zorita, E. & Cubasch, U. (1993). Downscaling of global climate change estimates to regional scales: an application to Iberian rainfall in wintertime. *J. Clim.*, 6: 1161-1171.
- von Storch, H. (1995). Inconsistencies at the interface of climate impact studies and global climate research. *Meteorologische Zeitschrift*, 4: 72-80.
- Washington, W.M. & Parkinson, C.L. (1986). *An introduction to three-dimensional climate modeling*. Oxford University Press: Oxford a.o., 422 pp.

- Weischet, W. (1991). *Einführung in die allgemeine Klimatologie*. Teubner: Stuttgart, 275 pp.
- Wilks, D.S. (1989a). Conditioning stochastic daily precipitation models on total monthly precipitation. *Water Resour. Res.*, 25(6): 1429-1439.
- Wilks, D.S. (1989b). Statistical specification of local surface weather elements from large-scale information. *Theor. Appl. Climatol.*, 40(2): 119-134.
- Wilks, D.S. (1992). Adapting stochastic weather generation algorithms for climate change studies. *Clim. Change*, 22: 67-84.
- Wilson, L.L. & Lettenmaier, D.P. (1992). A hierarchical stochastic model of large-scale atmospheric circulation patterns and multiple station daily precipitation. *J. Geophys. Res. D*, 97(D3): 2791-2809.
- Woo, M.-K. (1992). Application of stochastic simulation to climatic-change studies. *Clim. Change*, 20: 313-330.
- Zorita, E., Hughes, J.P., Lettenmaier, D.P. & von Storch, H. (1995). Stochastic characterization of regional circulation patterns for climate model diagnosis and estimation of local precipitation. *J. Clim.*(8): 1023-1042.
- Zucchini, W. & Guttorp, P. (1991). A hidden Markov model for space-time precipitation. *Water Resour. Res.*, 27(8): 1917-1923.