Abschlußbericht

zum Forschungsprojekt

Untersuchungen zur Verwendung von Ergebnissen verschiedener Klimamodelltypen als Antrieb in Ökosystemmodellen

Förderkennzeichen: 01 LK 9325/8

Zeitraum: 01.09.1995 - 31.10.1998

Kurzbezeichnung: KLIMÖKOMO

Projektleiter: Dr. habil. P.C. Werner

Wiss. Mitarbeiter: Dr. G. Bürger

Dr. habil. F.-W. Gerstengarbe

Techn. Mitarbeiter: U. Werner

Potsdam Januar 1999

Inhaltsverzeichnis

		Seite
1	Zusammenfassung/Summary	3
2	Ziel- und Aufgabenstellung	3
3	Ergebnisse	5
3.1	Die Methode des “Expanded Downscaling”	5
3.1.1	Stand der Forschung	5
3.1.2	Prinzip der Methode	7
3.1.3	Probit Normalisierung	8
3.1.4	Anwendungen	9
3.2	Klima Disaggregation	9
3.2.1	Globales Disaggregationsschema C2W	9
3.2.2	Anwendungen	10
3.3	Das multivariate Szenarienmodell	10
3.3.1	Stand der Forschung	10
3.3.2	Prinzip des Modells	12
3.3.4	Anwendungen	15
4	Wertung der Ergebnisse	17
5	Projektcharakteristika	18
5.1	Mittelverbrauch	18
5.2	Zeitlicher Verlauf	18
5.3	Kooperationen	18
5.4	Tagungen, Veröffentlichungen	19
6	Ausblick	20
7	Literaturliste	20
8	Anhang	21

1 Zusammenfassung/Summary

Im Rahmen des Projektes wurden zwei Modelltypen entwickelt, die es ermöglichen, globale Klimamodellergebnisse in die regionale Skala zu transformieren. Mit diesen Modellen lassen sich Szenarien der zukünftigen Klimaentwicklung berechnen, deren Ergebnisse als Eingangsdaten in der Klimafolgenforschung verwendet werden können. Die Validierung zeigte, daß für beide Modelle eine hohe Genauigkeit bei der Berechnung der Szenarien erreicht werden konnte. Inzwischen werden beide Modellvarianten in verschiedenen anderen Forschungsprojekten erfolgreich eingesetzt.

In the framework of the project two types of models were developed to transform global climate model results into a regional scale. With these models scenarios of future climate changes can be calculated. Its results can be used as input for the climate impact research. The validation has shown that the two models reach a high standard of accuracy in scenario calculation. Meantime the two model types are applied successfully in other research projects.

2 Ziel- und Aufgabenstellung

Mit dem Projekt sollte die Frage geklärt werden, inwieweit die derzeit verfügbaren Ergebnisse verschiedener Klimamodelltypen als Antrieb für eine Anzahl ausgewählter Ökosystemmodelle verwendet werden können und welche alternativen Möglichkeiten es gibt, diese Modelle mit Klimadaten zu versorgen. Dabei wurde auf Ergebnisse globaler Klimamodelläufe für eine definierte Anzahl von Gitterpunkten bzw. Gebieten in Mitteleuropa zurückgegriffen. Es wurden verschiedene Skalen der Ökosystemmodelle - vom Punktmodell bis hin zum globalen Modell - berücksichtigt. Mit dem Projekt sollten folgende wissenschaftliche Arbeitsziele erreicht werden:

1. Aufbau eines statistischen Modells zur Bereitstellung von Klimamodelldaten für verschiedene Skalen
2. Nach Aufbau und Prüfung dieses Modells gezielte Anwendung auf ausgewählte Gebiete, Punkte und Zeiträume
3. Beschreibung des statistischen Verhaltens der Modellergebnisse unter besonderer Berücksichtigung der Extreme
4. Diskussion der auftretenden Kopplungsprobleme
5. Interpretation und Zusammenfassung der Ergebnisse.

Es war geplant, die erreichten Ergebnisse nutzbar zu machen für:

1. ein besseres Verständnis bezüglich der Weiterverwendung von Klimamodellergebnissen
2. die Verbesserung der Klimamodelle
3. die Verbesserung der Ökosystemmodelle
4. eine Skalen-Annäherung von Klima- und Ökosystemmodellen
5. die Abschätzung der Folgen von Klimaänderungen.

Folgende Vorgehensweise wurde dazu erarbeitet:

Datengrundlage

Alle Untersuchungen wurden auf Tageswertbasis durchgeführt. Verwendet wurden die wesentlichen klimatisch relevanten meterologischen Größen (Temperatur - Maximum, Minimum, Mittel, Niederschlag, relative Luftfeuchte, Wasserdampfdruck, Sättigungsdefizit, Luftdruck, Bewölkung, Windgeschwindigkeit, Sonnenscheindauer, Strahlung, Schneehöhe und Nebel). Diese Daten standen zur Verfügung als Beobachtungswerte an ausgewählten Stationen, als Analysewerte auf einem Gitter sowie als Modellergebnisse für verschiedene Modelläufe des “General Circulation Model” (GCM) des MPI Hamburg.

Methodenentwicklung

Auf der Basis der bisher bekannten Verfahren zum statistischen “Downscaling” sollte eine erweiterte Methode entwickelt werden, die die lokale Varianz der einzelnen Parameter besser berücksichtigt.
Außerdem wurde geplant, ein mulitivariates Modell zu entwickeln, das es erlaubt, in Kopplung von verallgemeinerten GCM-Ergebnissen mit Beobachtungsdaten regionale Szenarien zu berechnen.

Software-Entwicklung

Parallel zur Methodenentwicklung mußte die Software-Entwicklung verlaufen, um entsprechende Validierungen der neuen Methoden zu ermöglichen und anwendungsbereite Datensätze für die Ökosystemforschung zur Verfügung stellen zu können.

Modellprüfung

Unter Verwendung vorhandener und neu zu entwickelnder Statistikprogramme war vorgesehen beide Verfahren anhand von Trainings- und Testkollektiven zu validieren und gegebenfalls sukzessive zu verbessern.

Anwendung

Nach der Entwicklung und Validierung der Methoden sollten Datensätze zu verschiedenen Szenarien für den klimatologischen Antrieb der jeweiligen Ökosystemmodelle berechnet und zur Verfügung gestellt werden. Dem sollte sich eine Bewertung der Ergebnisse der Ökosystemmodelle anschließen.

Bewertung

Abschließend war geplant in Form eines Abschlußberichtes die bei der Methodenentwicklung und -validierung und bei der Auswertung der Ergebnisse gewonnenen Erfahrungen zu dokumentieren, um auf sie sowohl bei der Weiterentwicklung der Methoden als auch zur Bereitstellung zukünftiger Klimaszenarien für die Klimafolgenforschung zurückgreifen zu können.

3 Ergebnisse

3.1 Die Methode des “Expanded Downscaling”

3.1.1 Stand der Forschung

a) Klimamodell und Skalen

Der Einfluß des Klimas oder eventueller Klimaänderungen äußern sich für den Menschen, bzw. die meisten sonstigen Ökosystemen, durch rein lokale Phänomene wie Wetter, Fluß- oder Meeresstände, Gletscher, oder auch Dürre- und Flutkatastrophen. Normalerweise sind derartige Phänomene geographisch sehr heterogen. Eine globale Klimaerwärmung etwa wird sich nicht überall gleichmäßig zeigen, sondern nur bestimmte Regionen betreffen, während andere Regionen sich gar nicht ändern mögen oder sich sogar abkühlen. Diese Heterogenität ist moderat für Größen wie Temperatur oder Luftdruck, welche eine typische räumliche Skale in der Größenordnung von Kontinenten oder Subkontinenten aufweisen. Für andere Größen, wie etwa Niederschlag oder Feuchtigkeitsmaße, ist sie praktisch maximal, mit charakteristischen Skalen von Kilometern bis hinunter zu Metern. Die beste Veranschaulichung hierfür ist die Größe von Wolken.

Globale Klimamodelle, als computergestützte Simulationen von historischem oder zukünftigem Globalklima, basierend auf physikalisch-chemischen Grundgleichungen, benötigen für ein realistisches Funktionieren geographische Informationen der Erde, wie etwa die der Land-Meer Verteilung, in mehr oder weniger hoher Auflösung. Die charakteristische Skala, d.h. die ungefähre Größe der Phänomene, welche gerade noch realistisch dargestellt werden, liegt derzeit bei Kontinental- bzw. Subkontinentalgröße, je nach betrachteter physikalischer Größe. Man beachte andererseits, daß die geographische Auflösung selbst sehr viel feiner ist, mit wenigen hundert Kilometern. Nun ist es offensichtlich, daß man einen Kompromiß finden muß zwischen der gewählten geographischen Auflösung und der veranschlagten Rechenzeit. Als Beispiel: derzeitige Klimamodelle mit einer Auflösung von ca. 200 km benötigen für die Simulation eines Klimajahrhunderts ungefähr ein halbes Jahr Rechenzeit auf den schnellsten Computern der Welt.

b) Downscaling

Es ist daher ratsam, die relativ grobe Auflösung eines Klimamodells nicht direkt für Anwendungen in, meistens hochauflösenden, Ökosystemmodellen zu verwenden. Seit einigen Jahren gibt es Methoden, sich die Information eines Klimamodells für die kleinen Skalen zunutze zu machen, und zwar auf indirektem Wege. Diese als ‚downscaling‘ bezeichneten Methoden basieren auf der simplen Tatsache, daß sich das lokale Wettergeschehen, hier mit l bezeichnet, immer bis zu einem gewissen Grade aus der jeweilig vorherrschenden großräumigen Zirkulation, hier g, ergibt, nach einem Gesetz

$$l = f(g) \tag{1}$$

mit einer passend zu wählenden *Transferfunktion f.* Sie wird in der Regel durch Fehlerminimierung bestimmt (*Regression*, s.u.), wobei man sich auf schon beobachtete lokale meteorologische Reihen in hoher zeitlicher Auflösung und Zirkulationsfelder stützt. Einmal bekannt, läßt sich (1) auf die von den Modellen gelieferten Zirkulationsfelder anwenden, und ermöglicht so die Modellierung des lokalen Wettergeschehens je nach Vorgabe der globalen Klimasimulation (z.B. eines bestimmten Szenarios). Voraussetzung für diesen Ansatz bleibt natürlich eine realistische Simulation der großräumigen Zirkulation.
Die einfachste Klasse von Transferfunktionen bilden die linearen. Hier geht es um die Bestimmung einer Matrix **L**, welche möglichst exakt die Gleichung

$$\hat{l} = Lg \tag{2}$$

erfüllt (wobei g und l als Anomalien relativ zum Langzeitklima gedacht sind). Dies ist die klassische Form der statistischen Regression. **L** wird bestimmt, indem der Modellfehler, Lg - l , bzw. die Modellfehlerkovarianz, minimiert wird. Als Kostenfunktion ergibt sich:

$$\Gamma(L) = tr\left(\left\langle (Lg - l)\,(Lg - l)^T \right\rangle\right) \tag{3}$$

(wobei "〈 〉" den Erwartungswert bedeutet, und "*tr*" die Spur). Bezeichnen wir die Kreuzkovarianz zweier Prozesse x und y mit $\mathbf{C}_{xy}$ (und $\mathbf{C}_x$ für x=y), so ergibt sich für einen hinreichend langen Beobachtungszeitraum:

$$\Gamma(L) = tr\left(LC_gL^T - LC_{gl} - C_{lg}L^T + C_l\right) \tag{4}$$

Das Minimum hiervon ergibt sich aus dem Ansatz $\partial\Gamma/\partial\mathbf{L}=0$, was auf die bekannte Regressionsgleichung

$$L = C_{lg} \cdot C_g^{-1} \tag{5}$$

führt.

3.1.2 Prinzip der Methode

Die Regressions-Gleichung (5) repräsentiert die generische Lösung des klassischen statistischen (linearen) downscaling. Sie und etliche Derivate sind die am häufigsten benutzten Ansätze für Klimafolgen-Abschätzungen. Jedoch beschränken sich die häufigsten Anwendungen von (5) auf Zeitskalen von nicht kürzer als einem Monat, wofür sie allerdings sehr befriedigende Ergebnisse liefern. Bei kürzeren Zeitskalen offenbart sich eine wesentliche Schwäche des Regressionskonzeptes, welches gerade für Anwendungen für Ökosystemmodelle, die meistens auf diesen kurzen Zeitskalen operieren, fatale Folgen haben kann. Und zwar ist die modellierte lokale Variabilität beschränkt durch die bestehenden Korrelationen zwischen den lokalen Größen und den Zirkulationsfeldern. Dies ist nur natürlich, da bei niedrigen Korrelationen das Regressionsmodell, um größere Fehler zu vermeiden, auf kleine Amplituden 'ausweicht'. Für einige Größen, wie etwa Temperatur oder Druck, zeigt sich in den Simulationen eine um ca. 20% reduzierte Variabilität, die man als noch tragbar ansehen kann. Völlig untragbar wird es hingegen z.B. für den Niederschlag. Hier beobachtet man, daß die modellierten Werte sich kaum vom langjährigen Mittel unterscheiden, was insbesondere zur Folge hat, daß überhaupt keine größeren Niederschlagsmengen vorkommen. Dies hängt zum einen an der relativ geringen Korrelation des Niederschlages zur vorherrschenden Zirkulation, zum anderen aber auch an der Nicht-Normalität der Niederschlagsverteilung (schiefe Verteilung: viele trockene Tage, relativ seltene Extremniederschläge).

Beiden Problemen, geringe Korrelation sowie Nicht-Normalität, wird Rechnung getragen in dem alternativen Ansatz des 'expanded downscaling' (EDS). Der englische Name leitet sich her von der Eigenschaft, daß die durch EDS modellierte Variabilität expandiert wird hin zu der originalen. Dies wird bewerkstelligt durch eine Modifikation des klassischen Regressionsprinzips der Fehlerminimierung, welches wir hier für die Klasse der linearen Transferfunktionen (des linearen downscaling) genauer anführen:

Mathematisch gesehen stellt die Regression ein unbeschränktes Minimierungsprinzip dar (hier des Modellfehlers, siehe (4)). Wenn wir nun das Gewünschte – die Erhaltung der lokalen Variabilität – als Nebenbedingung einführen, wird hieraus ein *beschränktes Minimierungsprinzip.* Da beobachtete und modellierte lokale Variabilität durch $\mathbf{C}_l$ bzw. den Term LC_gL^T gegeben sind, läßt sich folgende Minimierungsaufgabe mit Nebenbedingung formulieren:

$$\begin{aligned} \Gamma\ (L) &= \min \\ LC_gL^T &= C_l \end{aligned} \qquad (6)$$

Das Problem (6) besitzt unter normalen Bedingungen eine eindeutige Lösung, die wir fortan mit $\tilde{L}$ bezeichnen. Wird das downscaling (2) mithilfe dieses $\tilde{L}$ betrieben, wird im folgenden von 'expanded downscaling' gesprochen (Anhang 1).

Bemerkung: Wir weisen darauf hin, daß eine ähnliche Erweiterung auch für nichtlineare Regressionen, wie etwa bei neuronalen Netzen, möglich ist (Anhang 2).

3.1.3 Probit Normalisierung

Wir erwähnten schon, daß (2) bei linearem downscaling auf Anomalien angewandt wird. Anomalien haben aber nur dann einen Sinn, wenn es sich um normalverteilte Größen handelt. So sind etwa die Zirkulationsgrößen g normal. Andererseits erhält Gleichung (2) Normalität, weshalb die so modellierte Größe l wieder normalverteilt sein muß. Dies führt für alle nicht-normalen Größen zu Inkonsistenzen. Daher ist es notwendig bzw. wünschenswert, zunächst sämtliche Größen auf normalverteilte zu transformieren und dort die Modellierung durchzuführen, um sie abschließend wieder zurückzutransformieren. Tatsächlich ist es möglich, jede beliebige (stetige) Zufallsgröße auf eine (0,1)-normalverteilte zu transformieren (mit Mittelwert 0 und Varianz 1). Dies geschieht mithilfe der **prob**ability **i**ntegral **t**ransformations (probits). Für eine Zufallsvariable X mit korrespondierender kumulativer Verteilungsfunktion F läßt sich das probit Ψ und sein Inverses berechnen aus

$$Y = \Psi(X) = \Phi^{-1}(F(X)) \tag{7a}$$

$$X = \Psi^{-1}(Y) = \Phi\left(F^{-1}(Y)\right) \tag{7b}$$

mit der kumulativen Verteilungsfunktion Φ der (0,1)-Normalverteilung. Für empirisch gegebene Zufallsvariablen ergibt sich daher die Aufgabe, die Funktion Ψ, welche nur an diskret vielen Punkten existiert, durch eine stetige Funktion zu approximieren. Für Größen, die schon normalverteilt sind (wie etwa Temperatur), ist Ψ eine lineare Funktion, für die also 2 Parameter zu bestimmen sind (i.W. Mittelwert und Varianz). Für nicht-normalverteilte Größen ist Ψ nichtlinear. Innerhalb dieses Projektes haben wir für jede Variablenart eine Funktionenklasse ausgesucht, die mit möglichst wenig Parametern die besten Approximationsresultate liefert. Als Beispiel sei hier das probit für Niederschlag angeführt:

$$Y = \alpha + \ln(X + \beta) \tag{8a}$$

$$X = e^{Y-\alpha} - \beta \tag{8b}$$

Die Funktionen (8) sind stark nichtlinear, und es hat sich im Verlaufe der Untersuchungen gezeigt, daß eine korrekte Abschätzung der Parameter α und β eine hochgradig nichttriviale Aufgabe darstellt. Vor allem die Simulation von Starkniederschlägen ist extrem sensitiv gegenüber kleinen Veränderungen in α oder β. Dies wird besonders wichtig für Extremklimate wie etwa dem Mittelmeerraum.

3.1.4 Anwendungen

a) Für die Station Potsdam

Eingeführt und gestestet wurde das EDS zum ersten Mal für die Station Potsdam mit insgesamt 12 gemessenen Größen, für den Zeitraum 1962-89. Für diese Zeit gibt es auch entsprechende Beobachtungen (Analysen) der großräumigen Zirkulation vom National Center for Environmental Prediction (NCEP, Boulder/USA). Wir beschränkten uns auf das Gebiet des Nordatlantiks und Europa. Im Rahmen der Brandenburg-Studie des PIK wurden mit dem EDS auch 3 Klimaszenarien gerechnet (”business as usual”, ”2xCO_2”, ”drastic reductions”, siehe Bürger 1996). Als Klimamodell wurde das etwas ältere gekoppelte Hamburger Modell ECHAM1/LSG gewählt (Anhang 1).

b) Für ein Erosionsmodell (Cortina, Italien)

Diese Arbeit entstand durch eine Kooperation mit Herrn Martin Dehn am Geographischen Institut der Universität Bonn. Für die alpine Station Cortina wurden Temperatur und Niederschlag modelliert; die Zirkulationsfelder waren dieselben wie in a). Als Klimaszenarien wurde das Szenario IS92a (i.W. ”business as usual”) mit Aerosolen, für die Periode 1860-2100, mit dem Hamburger Modell ECHAM4/OPYC3 verwendet.

c) Für ein hydrologisches Modell (Gebiet Stör, Schleswig-Holstein)

Hier wurden für 4 Stationen mit jeweils 14 gemessenen Größen EDS-Versionen derselben Hamburger Klimaszenarien aus b) berechnet.

3.2 Klima Disaggregation

3.2.1 Globales Disaggregationsschema C2W

Aus der Notwendigkeit, für gegebene klimatische Bedingungen Zeitreihen zu entwickeln, wurde die Idee eines Klima-Disaggregationsschemas geboren. Dies war zunächst als Baustein für ein globales dynamisches Vegetationsmodell gedacht, hat sich dann aber schnell verselbständigt. Grundlage des Schemas bildet die Darstellung des globalen Klimas anhand der Probit-Parameter (siehe 3.1.3). Dies wird geleistet für eine Sammlung von 8000 weltweit verteilten Klimastationen (außer Afrika), von denen monatliche probit-Parameter für die Minimum- und Maximumtemperatur sowie den Niederschlag abgeschätzt werden. Es zeigt sich für jede dieser Variablen, daß die 12x8000 Parameter-Paare linear korreliert sind. (Im Wesentlichen drückt sich hier die Tendenz ”wärmeres Klima → größere Feuchte → geringere Variabilität” aus). Daher läßt sich das Weltklima durch einen einzigen Parameter pro Ort approximieren.

Der wesentliche Schritt ist nun, eine Zuordnung zu erstellen zwischen diesem einen Probit-Parameter und dem zugehörigen Klimamittel. Dies geschieht mit Hilfe einer Technik, die den Monte-Carlo Methoden nicht unähnlich ist. Die Details werden beschrieben in Bürger (1997). Dadurch ist es möglich, aus Klimakarten, welche langjährige Mittelwerte für die oben erwähnten 3 Größen darstellen, "Probit-Karten" zu berechnen, mit denen man nun Wettergeneratoren laufen lassen kann. Will man außerdem die internen Korrelationen der 3 Größen berücksichtigen, empfielt es sich, einen autoregressiven Prozeß erster Ordnung anzupassen (Bürger, 1997; Anhang 3).

3.2.2 Anwendungen

a) Waldmodell FORSANA

Die Wirkung von Klimavariabilität auf Nadelwälder wurden anhand des Modells FORSANA untersucht. Insbesondere konnten die unterschiedlichen Wirkungen von Änderungen des Klimamittels und der Klimavariabilität betrachtet werden mit dem Resultat, daß letzteres einen stärkeren Einfluß zu haben scheint (siehe Grote et.al. 1998).

b) Waldmodell FORSKA

In der Studie Lasch et.al. (1998) wurden die unterschiedlichen Antworten des Waldmodells FORSKA auf verschiedene räumliche und zeitliche Auflösungen untersucht. Ein Ergebnis war, daß insbesondere eine hohe zeitliche Auflösung, mit möglicher Simulation extremer Ereignisse, entscheidende Veränderungen hervorbringt.

c) Dynamisches Vegetationsmodell IBIS

Hier wird C2W als Klimakomponente in das dynamische globale Vegetationsmodell IBIS (Madison, U.S.A.) eingebaut.

d) Weitere EDS-Berechnungen

Zusätzlich wurden Szenarienberechnungen durchgeführt für das Ruhrgebiet (Universität Köln), Cortina/Italien (Dehn et al., 1998), den Harz (Schmidt, 1995) sowie die Nordsee (Bauer & Bürger, 1998).

3.3 Das multivariate Szenarienmodell

3.3.1 Stand der Forschung

Das Klimasystem der Erde ist ein hochgradig nichtlineares System. Das heißt, daß deren Entwicklung nicht oder nur in sehr beschränktem Maß vorhersagbar ist (Lorenz, 1963). Um trotzdem zu Aussagen über mögliche Klimaentwicklungen bzw. deren Auswirkungen zu kommen, geht man den Weg über die Szenarienentwicklung. Unter einem Szenarium versteht man dabei die Beschreibung eines sich einstellenden Klimazustandes, wenn über einen definierten Zeitraum bestimmte Annahmen zur Änderung bestimmter Einflußgrößen gemacht werden. (Bekanntestes Beispiel ist die Erhöhung

der Konzentration der Treibhausgase in der Atmosphäre.) Die Art des Szenariums richtet sich nach den Änderungsgrößen, dem gewählten Maßstab sowie der spezifischen Fragestellung. Werkzeuge zur Szenarienerstellung sind sowohl Klimamodelle (Energie-Bilanz-Modelle, Zirkulationsmodelle) als auch statistische Methoden, die auch gekoppelt angewendet werden können. Im folgenden wird ein statistisches Modell zur Entwicklung von Klimaszenarien vorgestellt, dessen Grundlage sowohl Klimamodellaussagen als auch Beobachtungsdaten sind.
Werden globale Klimaänderungen erwartet, sind in erster Linie deren regionale Auswirkungen von besonderem Interesse. Da globale Klimamodelle zur Zeit und in absehbarer Zukunft nicht in der Lage sind, für eine Region verwendbare Modellergebnisse meteorologischer Parameter zu liefern (IPCC, 1995; siehe auch Kap. 3.1.1), muß zur Abschätzung von Klimaentwicklungen in solchen Gebieten auf andere Möglichkeiten der Datenbereitstellung zurückgegriffen werden. Dabei darf die Konsistenz sowohl räumlich, zeitlich als auch zwischen den meteorologischen Größen nicht verletzt werden.
Drei wesentliche Methoden zur Szenarienentwicklung werden zur Zeit diskutiert:

Im Rahmen der ersten Methode wird versucht, ein regionales Klimamodell zu entwickeln, daß in ein globales eingebettet ist und von diesem mit den notwendigen Randwerten versorgt wird (z.B. Machenhauer et al., 1996). Der Vorteil dieser Vorgehensweise liegt in der physikalischen Verknüpfung großskaliger und kleinskaliger Prozesse. Der Nachteil ist, daß Verknüpfungen und Prozesse zur Zeit noch zu ungenau modelliert werden und so zu Fehlern führen, die eine Weiterverwendung der Ergebnisse in der Regel nicht möglich macht.

Die zweite Methode verwendet Klimamodellergebnisse, die über statistische Vefahren in kleinerskalige Bereiche transformiert werden (Zorita et al., 1993 sowie Kap. 3.1 und 3.2). Der Vorteil dieser Methode besteht darin, daß direkt auf die Klimamodellergebnisse zugegriffen wird, so daß eine physikalische Fehlerfortpflanzung wie bei der Kopplung von Klimamodellen entfällt. Ein Nachteil liegt darin, daß die Fehler des Klimamodells durch den statistischen Ansatz nicht beseitigt werden, sondern direkt in das Szenarium eingehen.

Die dritte Methode geht davon aus, daß die großräumigen, vom Klimamodell angegebenen Änderungen für bestimmte meteorologische Größen in einer Region im Mittel als richtig anzusehen sind. Auf der Basis einer solchen Annahme werden langjährige Beobachtungsreihen mit entsprechenden statistischen Methoden so aufbereitet, daß sie diese Änderungen in Form eines Szenariums wiedergeben. Der Vorteil der Methode besteht darin, daß die vorhandenen Klimamodellfehler bei der Szenarienbildung auf ein Minimum reduziert werden, wobei die bereits angeführte Konsistenz erhalten bleibt. Von Nachteil ist der nicht mehr vorhandene physikalische Zusammenhang zwischen den Klimamodellergebnissen und denen des Szenariums.

Da die beiden erstgenannten Vorgehensweisen zur Zeit noch keine oder nur eingeschränkt befriedigenden Ergebnisse liefern, wurde hier der Versuch gemacht, auf der Basis der letztgenannten Methode ein Modell zu entwickeln, das zu einer Resultatsverbesserung führt.

3.3.2 Prinzip des Modells

a) Grundprinzip

Basis des Szenarienaufbaus sind beobachtete Zeitreihen meteorologischer Größen. Entsprechend der Aufgabenstellung, das heißt, der Beantwortung der Frage welche Entwicklungstendenz welcher meteorologischen Größe untersucht werden soll, wird eine Bezugsgröße für die Untersuchungen ausgewählt. Berücksichtigt werden muß dabei, welche meteorologische Größe in ihrer tendenziellen Entwicklung vom Klimamodell hinreichend genau reproduziert wird. (Sieht man zum Beispiel die großräumige Temperaturerhöhung in den nächsten Jahrzehnten als ein sicheres Ergebnis der Klimamodelle an, empfiehlt es sich, die Temperatur als Bezugsgröße auszuwählen.) Nach diesen Vorgaben wird der Bezugsgröße aus den Beobachtungen die vom Klimamodell vorgegebene Änderung aufgeprägt. Dies wird in der Regel ein Trend sein. Durch einen speziellen Algorithmus (s. Abbildung 1, Anhang 4) werden die anderen beobachteten meteorologischen Größen konsistent diesen Änderungen angepaßt. Dabei wird darauf geachtet, daß deren statistische Grundeigenschaften und Zusammenhänge im wesentlichen erhalten bleiben.

b) Beschreibung des beobachteten Klimas

- Statistische Charakteristika

Da, wie bereits erwähnt, die statistischen Charakteristika des simulierten Klimas nicht wesentlich von denen des beobachteten abweichen sollen, müssen letztere in einem ersten Schritt bestimmt werden. Hierbei handelt es sich um den Mittelwert (in der Simulation zuzüglich der vorgegebenen Änderung), der Standardabweichung, der Erhaltungsneigung, dem Jahresgang sowie der interannuellen Variabilität.
Eine detaillierte Beschreibung dieser Charakteristika ist hier nicht notwendig, da diese als allgemein bekannt vorausgesetzt werden. Es muß aber daraufhingewiesen werden, daß die Güte der Schätzung der Charakteristika wesentlich von der Länge der Beobachtungsreihen (Stichprobenumfang) sowie deren Qualität abhängt.
Eine wichtige Rolle spielt außerdem die zeitliche Auflösung der vorhandenen Beobachtungsreihen, die entsprechend gewählt werden muß (z.B. Tageswerte).

- Einbeziehung komplexer Zusammenhänge

Hat man eine Bezugsgröße festgelegt, so werden gleiche bzw. ähnliche Werte innerhalb der Beobachtungsreihe auftreten. Dabei können die Ursachen, die zu diesen Werten führen durchaus unterschiedlich sein. (Gleiche Tagesmitteltemperaturen können sowohl bei großer als auch kleiner Tagesamplitude auftreten.) Dies wiederum hat Auswirkungen auf die dazu parallel auftretenden anderen meteorologischen Größen. Um hier zu einer richtigen Erfassung dieser komplexen Zusammenhänge zu kommen, muß die Bezugsgröße durch mehrere sie beschreibende Parameter charakterisiert werden. Bei der angeführten Temperatur können dies das Tagesminimum, das Tagesmaximum und die Tagesamplitude sein. Müssen die jahreszeitlichen Variationen noch berücksichtigt werden, ist ein weiterer Parameter zur Beschreibung nötig, wie zum Beispiel die astronomisch mögliche Sonnenscheindauer.

Nach Festlegung der die Bezugsgröße beschreibenden Parameter kann man diese mit Hilfe multivariater Verfahren exakt klassifizieren. In dem vorliegenden Modell wird dazu ein speziell dafür entwickeltes Cluster-Analyseverfahren verwendet (Gerstengarbe, Werner, 1997). Diese Methode ermöglicht es, die Werte der Bezugsgröße in statistisch signifikant voneinander getrennte Cluster einzuteilen bei gleichzeitig automatischer Bestimmung der optimalen Cluster-Anzahl. Dabei erfolgt die Clusterung nach einer vorgegebenen Elementauswahl, in diesem Fall nach der Zeiteinheit (z. B. Tag). Man erhält also eine Anzahl von Clustern, in denen jeweils eine bestimmte Menge von Elementen (Tage einer Zeitreihe) enthalten ist. Somit lassen sich jedem Element in einem Cluster die konkreten Werte der anderen meteorologischen Größen exakt zuordnen. Die weitere Verwendung der mit der Cluster-Analyse aus der Beobachtungsreihe gewonnenen Ergebnisse wird in Abschnitt d) erläutert.

c) Erstellung des simulierten Klimas

- Bearbeitung der Bezugsgröße

Die Erstellung der simulierten Reihe der Bezugsgröße erfolgt in mehreren Schritten. Gegeben sind dazu die Tagesmittelwerte einer mehrjährigen Beobachtungsreihe.

1. Schritt Berechnung der Jahresmittelwerte aus den Beobachtungen, Bestimmung der interannuellen Variabilität und Rangbestimmung. Die Rangbestimmung ist notwendig, um die Witterungscharakteristik der einzelnen Jahre besser erfassen zu können.

2. Schritt Erzeugung einer simulierten Reihe der Jahresmittelwerte mit Hilfe eines Zufallszahlengenerators unter Berücksichtigung der statistischen Eigenschaften der Beobachtungsreihe und Rangbestimmung.

3. Schritt Aufprägung der vorgegebenen Änderung (Trend) auf die simulierte Reihe.

4. Schritt Bestimmung der Anomalien zwischen Tageswert und Jahresmittelwert für jedes Jahr der Beobachtungsreihe.

5. Schritt Jedem simulierten Jahr werden entsprechend seines Ranges die entsprechenden Anomalien der Tageswerte zufällig zugeordnet. Dabei setzt sich jeder Tageswert zusammen aus Summe von Jahresmittelwert, dem Wert der Änderung und dem Anomaliewert.

6. Schritt Da der Erhalt der statistischen Charakteristika eine wichtige Randbedingung darstellt, muß die simulierte Reihe entsprechend überprüft und gegebenenfalls korrigiert werden.

7. Schritt Um im folgenden auf die Beobachtungsgrößen zurückgreifen zu können, werden die gleichen, die Bezugsgröße beschreibenden Parameter (s. Cluster-Analyse) für die simulierte Reihe bestimmt.

d) Verknüpfung von beobachtetem und simuliertem Klima

Mit Abarbeitung des 6. Schrittes aus Abschnitt c) ist die Simulation der Bezugsgröße vollständig abgeschlossen. Dieser Bezugsgröße müssen nun die anderen meteorologischen Größen zugeordnet werden. Dazu werden die im 7. Schritt berechneten Parameterkombinationen verwendet. Jede dieser Parameterkombinationen läßt sich in eines der berechneten Cluster der Beobachtungsreihe (s. Abschnitt b)) mit Hilfe des Abstandes von Mahalanobis (Weber, 1980) einordnen. Danach wird ein Element (Tag) aus diesem Cluster "bedingt zufällig" ausgewählt. Dadurch können die anderen meteorologischen Größen unter Wahrung der Konsistenz dem jeweiligen Tag in der simulierten Reihe zugeordnet werden. "Bedingt zufällig" bedeutet dabei, daß zur Sicherung der Erhaltungsneigung der jeweilig davorliegende Tag bei der Auswahl berücksichtigt wird. Behandelt werden muß jetzt noch die Situation, daß aufgrund der vorgegebenen Änderung (Trend) Werte in der simulierten Reihe der Bezugsgröße auftreten, die außerhalb des Wertebereichs der Beobachtungsreihe liegen. In diesem Fall wird angenommen, daß die Werte der anderen meteorologischen Größen ihren beobachteten Wertebereich nicht verlassen. Dieses Vorgehen ist berechtigt, da Voruntersuchungen gezeigt haben, daß in diesem Fall der Fehler deutlich geringer ist als bei einer nicht gesicherten Extrapolation dieser Größen. Damit ist es möglich, die zuzuordnenden Elemente entsprechend der geschilderten Vorgehensweise aus den den extremalen Bereich beschreibenden Clustern zu entnehmen. Man erhält für eine Station ein vollständig simuliertes Klima, das durch die vorgegebenen meteorologischen Größen charakterisiert ist.
Zur Beschreibung der räumlichen Struktur des Klimas sind in der Regel mehr als nur eine Station notwendig. Sind mehrere Stationen (Beobachtungsreihen) vorhanden, muß bei der Erstellung des simulierten Klimas die beobachtete räumliche Struktur erhalten bleiben. Um dies zu gewährleisten wird wie folgt vorgegangen:
Bei der Beschreibung regionaler Klimaänderungen kann man davon ausgehen, daß das Untersuchungsgebiet im großräumigen Maßstab ein einheitliches Klimagebiet darstellt. Aus diesem Grund wird in einem ersten Schritt eine Bezugsstation ausgewählt, die die mittleren klimatischen Verhältnisse dieser Region am besten widerspiegelt. Für diese Station wird das simulierte Klima wie oben beschrieben erstellt. Da aufgrund dieser Vorgehensweise bekannt ist, welches Element (Tag) der Beobachtungsreihe an welcher Stelle der simulierten Reihe eingesetzt wurde, kann man für jede weitere - Beobachtungsreihe eine entsprechende simulierte Reihe erzeugen. Dabei bleibt die räumliche Konsistenz aufgrund der vorgegebenen Annahmen erhalten.

Anmerkung: Zusätzlich muß bei der Abarbeitung des geschilderten Algorithmus darauf geachtet werden, daß neben der Erhaltung der statistischen Eigenschaften der meteorologischen Größen die physikalische Gesetze nicht verletzt werden und innerhalb der simulierten Reihen keine Brüche entstehen (z.B. an Jahresübergängen).

3.3.4 Anwendungen

a) Nachweis der Leistungsfähigkeit der Methodik

- Vorgehensweise

Zum Nachweis der Leistungsfähigkeit der Methodik wurden aus der gesamten zur Verfügung stehenden Beobachtungsreihe der Station Potsdam (1893 - 1994) ein sogenanntes Schätzkollektiv (1893 - 1922) und in ein Testkollektiv (1965 - 1994) herausgezogen. Aus dem Testkollektiv wurde der Temperaturtrend bestimmt, und dem Schätzkollektiv entsprechend der vorgestellten Methodik aufgeprägt. Das heißt, es wurde auf der Basis des Schätzkollektivs ein Szenarium für den Testzeitraum erstellt. Anschließend wurden die Szenarienwerte mit den Beobachtungen des Testzeitraumes verglichen. Die wichtigsten Ergebnisse werden im folgenden diskutiert.

- Ergebnisse

Gute Simulationsergebnisse liegen dann vor, wenn Mittelwert und Standardabweichung der einzelnen Größen gut miteinander übereinstimmen, die Verteilungen in ihrer Struktur erhalten bleiben sowie die charakteristische Erhaltungsneigung für jede Größe möglichst exakt wiedergegeben wird. Das bedeutet für die Verteilungen nicht, daß die Simulations- bzw. Beobachtungsgrößen aus ein und derselben Grundgesamtheit stammen müssen. (Wäre dies der Fall, bekäme man kein Szenarium sondern eine Prognose, was der Aufgabenstellung nicht entsprechen würde.)
In der Tabelle 1 (Anhang 4) sind die Mittelwerte und Standardabweichungen der einzelnen Größen für den beobachteten bzw. simulierten Fall angegeben. Man erkennt, daß in jedem Fall die Abweichungen gering sind.
Für das Testkollektiv wurde ein Trend von 0.8 K berechnet und als Vorgabe im Schätzkollektiv verwendet. Als Beispiel ist in Abbildung 2 (Anhang 4) das Jahresmittel des Tagesmaximums der Lufttemperatur dargestellt. Es ist zu erkennen, daß der simulierte Trend sehr gut mit dem beobachteten übereinstimmt. Gleichzeitig bleibt die interannuelle Variabilität erhalten, allerdings ohne Beibehaltung eines synchronen Verlaufs, was auch nicht vorgesehen war (Prognose!). Betrachtet man die Häufigkeitsverteilungen in Abbildung 3 (Anhang 4) erkennt man, daß sowohl die zweigipflige Struktur der Temperatur als auch ihre relative Häufigkeit in den einzelnen Klassen erhalten bleiben obwohl simulierte und beobachtete Größe nicht aus der gleichen Grundgesamtheit stammen. Eine weitere wesentliche statistische Eigenschaft ist die Erhaltungsneigung. Sie kann mit Hilfe der Andauerhäufigkeitsverteilung oder auch der Autokorrelationsfunktion überprüft werden. Beide Verfahren sind wiederum für das Tagesmaximum der Lufttemperatur in den Abbildungen 4 bzw. 5 (Anhang 4) dargestellt. In beiden Fällen stimmen Beobachtung und Simulation sehr gut überein.
Gleich gute Ergebnisse werden für die anderen Temperaturgrößen erzielt (hier nicht dargestellt).
Da als Bezugsgröße die Temperatur gewählt wurde, verläuft die Szenarienbildung der übrigen meteorologischen Größen über das oben beschriebene Verfahren der Clusterbildung und -zuordnung. Dies ist methodisch gesehen ein anderes Vorgehen als bei der Simulation der Temperatur, so daß die Ergebnisse gesondert betrachtet werden müssen. Als exemplarisches Beispiel werden im folgenden die Ergebnisse der Niederschlagssimulation vorgestellt. Diese Größe wurde gewählt, weil sie

meteorologisch gesehen nur geringe konservative Eigenschaften aufweist (zeitlich und räumlich inkonsistentes Auftreten).
In Abbildung 6 (Anhang 4) ist der zeitliche Verlauf der Jahressummen des Niederschlags wiedergegeben. Man erkennt, daß Simulation und Beobachtung gut übereinstimmen, was durch die Werte für Mittel und Standardabweichung in Tabelle 1 bestätigt wird. Ein gleichgutes Ergebnis liefern die relativen Häufigkeiten der Tagessummen des Niederschlags in Abbildung 7 (Anhang 4). Da der Niederschlag vom Charakter her eine sehr geringe Erhaltungsneigung besitzt, ist eine Betrachtung der Autokorrelationsfunktion nicht sinnvoll. In diesem Fall kann man nur auf einen Vergleich der Andauerhäufigkeitsverteilungen für Tage ohne Niederschlag zurückgreifen (s. Abbildung 8, Anhang 4). Man erkennt, daß die simulierten Andauern bis zu drei Tagen deutlich über den beobachteten liegen. Gleichzeitig sind die sehr langen Andauern unterrepräsentiert. Ursache dafür ist der Informationsverlust, der bei der Abarbeitung des Zuordnungsalgorithmus' auftritt. Hier ist prinzipiell keine Verbesserung möglich. Allerdings liegt der Fehler noch im Rahmen der Genauigkeit, die für Szenarien vertretbar ist.
Für alle anderen untersuchten meteorologischen Größen (hier nicht graphisch dargestellt) weisen deren Simulationen bezüglich der Genauigkeit die gleichen Charakteristiken wie beim Niederschlag beschrieben, auf.
Damit ist nachgewiesen, daß die Methodik zur Lösung der vorgesehenen Aufgabe verwendet werden kann.

*b) Anwendungsbeispiel*e

Im ersten Beispiel wird unter Anwendung der Szenarienbildung die Waldbrandentwicklung im Land Brandenburg bis zum Jahr 2050 unter bestimmten Ausgangsbedingungen abgeschätzt. Brandenburg wurde ausgewählt, weil diese Region bezüglich der Waldbrandgefährdung zu den extrem stark betroffenen Gebieten Deutschlands gehört. Da es einen engen Zusammenhang zwischen dem Witterungsgeschehen und der Waldbrandgefährdung gibt, ist zu erwarten, daß sich das Waldbrandrisiko im Fall einer Klimaänderung ebenfalls verändern wird. Die durchgeführten Untersuchungen bestätigten diese Erwartungen. Das heißt, daß mit dem eingesetzten Modell gezeigt werden konnte, daß bei einer angenommenen Klimaänderung mit einer markanten, räumlich stark deutlich differenzierten Änderung des Waldbrandverhaltens zu rechnen ist. Die genaue Vorgehensweise bei dieser Untersuchung sowie die Diskussion der konkreten Ergebnisse können Anhang 5 entnommen werden.

Im zweiten Beispiel wurden Szenarien der zukünftigen Klimaentwicklung eingesetzt, um damit Bodenwasserhaushaltsgrößen für eine ausgewählte Region im Nordosten Brandenburgs abzuschätzen. Die Ergebnisse wurden auf der “Second International Conference on Climate and Water” in Espoo - Finnland (1998) vorgestellt und sind zur Veröffentlichung in den Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft eingereicht (s. Anhang 6).

In einer weiteren Anwendung wurden mit Hilfe des multivariaten Szenarienmodells Daten möglicher zukünftiger Klimate für das Land Brandenburg bereitgestellt, die Eingang in ein Forstmodell fanden. Ziel der Untersuchung war es u.a. Holzerträge flächendeckend abzuschätzen und Bewirtschaftungsempfehlungen zu geben. Eine Veröffentlichung dazu wurde eingereicht (Lasch et al., 1998, Anhang 7).

4 Wertung der Ergebnisse

Abschließend kann folgende Wertung der Ergebnisse gegeben werden:

- Es wurden zwei vom Ansatz her unterschiedliche Methoden zur regionalen Untersetzung von Klimamodellergebnissen entwickelt.

- Die Methode des “expanded downscaling” hat den Vorteil, daß dynamische Prozesse der globalen Skala in die regionale transformiert werden können. Der Nachteil besteht darin, daß alle Fehler des globalen Modells mitgeführt werden. Ein Einsatz dieser Methode empfiehlt sich dann, wenn ein für den jeweiligen Untersuchungszweck ausreichend genaues globales Klimamodell zur Verfügung steht.

- Das multivariate Szenarienmodell hat den Vorteil, daß die antreibenden Größen beliebig gewählt werden können und unterschiedlich genau sein können. Die Qualität der Ergebnisse hängt im wesentlichen nur von den jeweils zugrundegelegten Beobachtungsdaten ab. Nicht erfaßt werden durch die statistische Herangehensweise die dynamischen Prozesse. Die Anwendungsbeispiele dokumentieren, daß dieser Modelltyp zur Zeit die günstigste Variante zur Bereitstellung von Daten für die Klimafolgenforschung darstellt.

- Der Einsatz beider Modellvarianten in anderen Fachrichtungen und Forschungsprojekten zeigt, daß diese den zur Zeit aktuellen wissenschaftlichen Stand der Entwicklung widerspiegeln.

5 Projektcharakteristika

5.1 Mittelverbrauch

	geplant	verbraucht
Personal	246.953,- DM	251.284,20 DM
Werkverträge	10.000,- DM	10.000,- DM
Verwaltung	12.500,- DM	9.846,82 DM
Dienstreisen	6.500,- DM	4.821,98 DM
Gesamtausgaben	275.953,- DM	275.953,- DM

5.2 Zeitlicher Verlauf

Laufzeit

geplant: 01.01.1994 - 31.12.1996

realisiert: 01.09.1995 - 31.10.1998

5.3 Kooperationen

Wichtige Kooperationspartner waren:

Max-Planck-Institut für Meteorologie Hamburg

Fachliche Beratung bei der Auswahl von Klimamodellergebnissen

Deutsches Klimarechenzentrum

Bereitstellung von Daten aus Klimamodelläufen

Deutscher Wetterdienst

Bereitstellung von klimatologischen Beobachtungsdaten

Anmerkung: Die anderen, im Projektantrag vorgesehenen Kooperationspartner wurden nicht einbezogen, da jeweils entsprechende Ansprechpartner aus den anderen Abteilungen des PIK zur Verfügung standen.

5.4 Tagungen, Veröffentlichungen

Wichtige Tagungen

- IPCC Workshop on Reginal Climate Change for Impact Assessment, Imperial College, London, 1996

- The ECLAT Workshop, Climate Scenarios for European Climate Change Impacts Assessment: Network for the Disssemination of Climate Data, Climate Change Scenarios and Scientific Advice, Sissi, Crete, 1996

- 4. Deutsche Klimatagung, Frankfurt am Main, 1997

- Second International Conference on Climate and Water, Espoo, Finnland, 1998

Veröffentlichungen

Bürger, G. (1996): “Expanded downscaling for generating local weather scenarios”, Climate Research, 7, 111-128

Bürger, G. (1997): “On the disaggregation of climatological means and anomalies”, Climate Research, 8, 183-194

Gerstengarbe, F.-W., Werner, P.C. (1997): “Waldbrandentwicklung im LandBrandenburg”, AFZ - Der Wald, 7, 392-394

Lasch, P., Lindner, M., Ebert, B., Flechsig, M., Gerstengarbe, F.-W., Suckow, F., Werner, P.C. (1999): “Regional impact analysis of climate change on natural and managed forests in the Federal State of Brandenburg, Germany”, eingereicht bei Environmental, Modeling & Assessment

Weichert, A., Bürger, G. (1998): “Linear versus nonlinear techniques in downscaling”, Climate Research, 10, 83-93

Werner, P.C., Gerstengarbe, F.-W. (1997): “Proposal for the development of climate scenarios”, Climate Research, 8, 171-182

Wessolek, G., Gerstengarbe, F.-W., Werner, P.C. (1999): “A new climate scenario model and its application for regional water balance studies”, Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft, im Druck

6. Ausblick

Die im Rahmen dieses Forschungsprojektes erarbeiteten Methoden stellen einen ersten erfolgversprechenden Schritt zur Lösung der Skalierungsproblematik dar. Es wird angeregt, die Verfahren in weiteren Fachbereichen zur Bereitstellung von Klimaszenarien einzusetzen.
Außerdem sind von den Bearbeitern Vorstellungen entwickelt worden, die Modelle noch derart weiterzuentwickeln, daß eine differenziertere zeitliche Auflösung bei gleichzeitiger Vergrößerung der Anzahl der Bezugsvariablen möglich ist.

7. Literaturliste

Die folgende Literaturliste enthält die im Abschlußbericht zitierten Artikel (außer den bereits in 5.4 aufgeführten). Weitere Literaturangaben sind den Anhängen zu entnehmen.

Bauer, E., and G. Bürger (1998): “Linking North Sea waves with North Atlantic winds on daily time scales”, Subm. to *Tellus.*

Bronstert, A., Bürger, G., Heidenreich, M., Katzenmaier, D., Köhler, B. (1998):”Effects of climate change influencing storm runoff generation: Basic considerations and a pilot study in Germany”, Proceedings of the 2. International RIBAMOD Workshop on Impact of Climate Change on Flooding and Sustainable River Management, Wallingford, February 26-.27 1998 (in press).

Bürger, G. (1998): “Has the singularity of the spectral density matrix been overlooked?”, Subm. to *J Climate.*

Dehn, M., G. Bürger, J. Buma, and P. Gasparetto (1998): “Impact of climate change on slope stability using expanded downscaling”. Subm. to *Engineering Geology.*

Gerstengarbe, F.-W., Werner, P.C. (1997): “A method to estimate the statistical confidence of cluster separation”, Theor. Appl. Climatol., 57, 103-110

Grote, R., G. Bürger, and F. Suckow (1998): “Simulated impacts of mean vs. Intra-annual climate changes on forests”, In: The Impacts of Climate Variability on Forests. Springer, Berlin.

IPCC (1995): "Climate change 1995", Summary for policymakers, Cambridge University Press, Cambridge UK

Lasch, P., F. Suckow, G. Bürger, and M. Lindner, (1998): “Sensitivity analysis of a forest gap model concerning current and future climate variability”, In: The Impacts of Climate Variability on Forests. Springer, Berlin.

Lorenz, E.N. (1963): “Deterministic nonperiodic flow”, J. Atm. Sciences, 20 (130), 448

Machenhauer, B., Windelband, M., Potzet, M., Jones, R.G., Déqué, M. (1996): "Validation of present-day regional climate simulations over Europe: Nested LAM and variable resulution global model simulations with observed or mixed layer ocean boundary conditions", Max-Planck-Institut für Meteorologie, Report No. 191

Schmidt, J., 1995: “Basisdaten zur Abschätzung der Klimawirkung auf die Wasserversorgung in der Region Harz”, Herausgeg. v. d. Gesellschaft f. Umwelt e.V.

Weber, E. (1980): “Grundriß der biologischen Statistik”, VEB Gustav Fischer Verlag, Jena, 652 S.

Zorita, E., Hughes, J.P., Lettemaier, D.P., Storch, H.v. (1993): "Stochastic characterization of regional circulation patterns for climate model diagnosis and estimation of local precipitation", Max-Planck-Institut für Meteorologie, Report No. 109

8. Anhang

1 Expanded downscaling for generating local weather scenarios

2 Linear versus nonlinear techniques in downscaling

3 On the disaggregation of climatological means and anomalies

4 Proposal for the development of climate scenarios

5 Waldbrandentwicklung im Land Brandenburg

6 A new climate scenario model and its application for regional water balance studies

7 Regional impact analysis of climate change on natural and managed forests in the Federal State of Brandenburg, Germany