

AUSLEIH Exemplar

Umweltforschungszentrum GmbH  
Bibliothek  
Permoserstraße 15  
04318 Leipzig



# UFZ-Bericht

UFZ-Bericht • UFZ-Bericht • UFZ-Bericht • UFZ-Bericht

Umweltforschungszentrum Leipzig-Halle GmbH

Nr. 3/1995

## Modellierung von Bodenprozessen in Agrarlandschaften zur Untersuchung der Auswirkungen möglicher Klimaveränderungen

Wissenschaftliche Bearbeitung:

Uwe Franko (Projektleitung)  
Burkhard Oelschlägel  
Stefan Schenk

Sektion Bodenforschung  
UFZ-Umweltforschungszentrum  
Leipzig-Halle GmbH

ISSN 0948-9452

# **Modellierung von Bodenprozessen in Agrarlandschaften zur Untersuchung der Auswirkungen möglicher Klimaveränderungen**

Abschlußbericht zum Projekt:

**Modell und Parameter für die Simulation von  
Klimaänderungseffekten auf die Kohlenstoff- und  
Stickstoffdynamik im Boden sowie auf die Änderung von  
Bodeneigenschaften in Kombination mit Ertragsmodellen**

Wissenschaftliche Bearbeitung:

Uwe Franko (Projektleitung)  
Burkhard Oelschlägel  
Stefan Schenk

Sektion Bodenforschung  
UFZ-Umweltforschungszentrum  
Leipzig-Halle GmbH  
Hallesche Straße 44  
D-06246 Bad Lauchstädt

---

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministers für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie (BMBF) unter dem Förderkennzeichen 01 LK 9106/2 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

# Modellierung von Bodenprozessen in Agrarlandschaften zur Untersuchung der Auswirkungen möglicher Klimaveränderungen

## **Inhaltsverzeichnis**

1. Einleitung
2. Modellbeschreibung
  - 2.1. Aufbau und Organisation des CANDY-Systems
  - 2.2. Modellierung der Bodenprozesse
    - 2.2.1. C-N-Dynamik
    - 2.2.2. Temperaturdynamik
    - 2.2.3. Wasserdynamik
  - 2.3. Witterungsmodellierung
    - 2.3.1. Synthetische Wetterdaten
    - 2.3.2. Modellierung der einzelnen Witterungselemente
    - 2.3.3. Ergebnisse und Schlußfolgerungen
    - 2.3.4. Abbildung möglicher Klimaveränderungen
3. Modellvalidierung
  - 3.1. Meßfeld Bad Lauchstädt
    - 3.1.1. Anlage
    - 3.1.2. Standortcharakterisierung
    - 3.1.3. Meß- und Untersuchungsprogramm
    - 3.1.4. Ausgewählte Meß- und Untersuchungsergebnisse
    - 3.1.5. Vergleich von Meß- und Modellwerten
  - 3.2. OS-Akkumulation im Statischen Versuch Bad Lauchstädt
4. Integration des Simulationsmodells in ein geographisches Informationssystem
  - 4.1. Bestimmung der Bodenparameter und Anfangsbedingungen
  - 4.2. Darstellung der Ergebnisse
5. Anwendung des Systems auf ein Territorium im Gebiet der Querfurter Platte
  - 5.1. Bodendaten
  - 5.2. Bewirtschaftungsszenario
  - 5.3. Wetterdaten und Klimaszenarien
  - 5.4. Ergebnisse der Szenariorechnungen
6. Diskussion und Schlußfolgerungen
7. Zusammenfassung
8. Summary
9. Literatur

## 1. Einleitung

Der Boden bildet einen wesentlichen Bestandteil von Agrarökosystemen. Die lokale Ausprägung der Bodeneigenschaften bestimmt die Möglichkeiten und Grenzen einer umweltverträglichen und nachhaltigen Bodennutzung. Eine Reihe wichtiger Bodeneigenschaften wird durch den Gehalt des Bodens an organischer Substanz beeinflusst. Ein Teil der organischen Bodensubstanz (OBS) ist umsetzbar und unterliegt damit einer äußeren Kontrolle. Die Variationsbreite dieses umsetzbaren Anteils bestimmt den Bereich, in dem durch geeignete Bewirtschaftungsmaßnahmen eine Verbesserung der Bodeneigenschaften im Sinne einer nachhaltigen Landnutzung möglich ist. Die Dynamik des umsetzbaren Anteils der OBS wird sowohl von meteorologischen und geologischen Umweltbedingungen als auch von der Bewirtschaftung des Bodens bestimmt. Dabei spielt vor allem der Stickstoff als wichtigster Pflanzennährstoff und gleichzeitig potentieller Schadstoff eine wichtige Rolle. Es ist bekannt, daß der OBS-Gehalt eine Schlüsselfunktion für die normale Funktion von Agrarökosystemen besitzt. Dennoch gibt es bisher nur vorläufige Aussagen über einen Sollwertbereich für diese Größe. Da Änderungen im OS-Gehalt sehr langfristig verlaufen und im allgemeinen mehrere Jahrzehnte vergehen, bis Veränderungen der Umweltbedingungen oder der Bewirtschaftung ein neues Gleichgewicht des OS-Gehaltes hervorbringen, müssen solche Veränderungen sehr sorgfältig auf mögliche Auswirkungen für das gesamte Ökosystem überprüft werden. Solche Voraussagen sind nur mit Modellen möglich, die in der Lage sind, die langfristigen Veränderungen der OBS-Dynamik in ihrer Wechselwirkung mit den anderen Komponenten des Ökosystems abzubilden.

Die zu erwartenden Veränderungen der meteorologischen Bedingungen infolge eines globalen Klimawandels werden auch die Rahmenbedingungen für die im Boden ablaufenden Prozesse verändern. Entsprechende Veränderungen im OS-Haushalt werden die Folge sein.

Aus diesem Zusammenhang ergibt sich die Aufgabenstellung für ein Bodenmodell, das als Bestandteil komplexer Agrarökosystemmodelle in der Lage sein muß, die langfristigen Auswirkungen klimatischer Veränderungen abzubilden und durch Simulation verschiedener Szenarien erste Anhaltspunkte für eine möglichst nachhaltige Bewirtschaftung zu liefern.

An die Entwicklung dieses Bodenmodells wurden folgende Anforderungen gestellt:

- Abbildung sowohl langfristiger Veränderungen der OBS und davon abhängiger Eigenschaften als auch kurzfristiger Prozesse der Nährstofftransformation als Basis für die Kopplung mit Pflanzenmodellen
- Integration des Modells in ein Geographisches Informationssystem (GIS) zur Verwaltung der Daten, zur Organisation der Simulationsrechnungen und zur Präsentation der Ergebnisse
- Simulation von prognostizierten Klimaveränderungen und deren Auswirkung auf wichtige Bodeneigenschaften.

Der vorliegende Bericht gibt eine Übersicht über den erreichten Arbeitsstand. Der erste Teil ist einer umfassenden Darstellung der theoretischen Grundlagen für die einzelnen Teilmodelle des Systems gewidmet. Daran anschließend wird die Vorgehensweise zur Gewinnung von Klimaszenarien auf der Basis globaler Klimarechnungen erläutert. Ein weiterer Schwerpunkt bezieht sich auf die Ergebnisse der Modellvalidierung und gibt einen Überblick über die gewonnenen Meßergebnisse. Zum Abschluß wird die Integration des Modells in ein GIS am Beispiel eines Gebietes der Querfurter Platte einschließlich der erzielten Simulationsergebnisse zur Auswirkung von Klimaveränderungen beschrieben.

## **2. Modellbeschreibung**

### **2.1. Aufbau und Organisation des CANDY-Systems**

Das Simulationssystem CANDY (CARbon and Nitrogen DYNAMics) wurde entwickelt, um die Dynamik des Kohlenstoff- und Stickstoffumsatzes im Boden sowie der Bodentemperatur und des Bodenwassergehaltes als eindimensionale Prozesse für ein Bodenprofil bis zu einer Tiefe von 2 Metern zu beschreiben. Im folgenden wird zwischen dem Standard-System und dem in ein GIS integrierten System unterschieden. Das Standardsystem besteht aus einem in eine Bedieneroberfläche eingebetteten Simulationsmodell und umgebenden Datenbanken, die Informationen zu den erforderlichen Parametern, zum Modellantrieb sowie zu Anfangswerten und eventuell vorhandenen ergänzenden Meßreihen enthalten (Abb.2.1). Die CANDY-Oberfläche verwaltet Schlagdaten in schlaggruppenbezogenen Datenbanken. Eine Datenbank

gliedert sich in Festdaten, agrotechnische Maßnahmen, Meßwerte und Angaben zum aktuellen Status. Die Wetterdaten werden jahresweise für jede Meßstation in separaten Dateien gespeichert. Wesentliches Kennzeichen des Standardsystems ist die Homogenität der betrachteten Schläge. Das Simulationsmodell verarbeitet ausgehend von Startwerten zu den betrachteten Zustandsgrößen (Bodentemperatur, Bodenfeuchte, umsetzbare organische Substanz und Mineralstickstoff) Managementinformationen zu Bodenbearbeitung, mineralischer und organischer Düngung, Beregnung sowie Aufgang und Ernte. Die zeitliche Auflösung der Simulation erfolgt in Tagesschritten. Der Antrieb des Modells geschieht über die meteorologischen Daten Lufttemperatur in 2 m Höhe, Globalstrahlung und Niederschlag, die als Tageswerte vorliegen müssen.

Folgende Teilprozesse werden in unterschiedlicher Detailliertheit durch das Modell beschrieben:

- meteorologische Bedingungen (Zugriff auf Datenbanken oder Generierung von Datensätzen, Korrektur der gemessenen Niederschläge)
- Bodenwasserdynamik (potentielle und aktuelle Evapotranspiration, Versickerung)
- Bodentemperaturdynamik (Abschätzung der Oberflächentemperatur, Wärmeleitung im Boden)
- Auswirkung von Bewirtschaftungsmaßnahmen
- Bestandesentwicklung (Verlauf von Wurzeltiefe und Bedeckungsgrad, Ermittlung des N-Bedarfs)
- Umsatz (Mineralisierung und Humifizierung) von organischer Substanz und Stickstoffdynamik (Mineralisierung, Immobilisierung, Aufnahme, Auswaschung, gasförmige Verluste, symbiotische N-Bindung).

Das Bodenprofil wird dabei in homogene Schichten von jeweils 10 cm unterteilt.

Jede Bodenschicht wird durch die Parameter Trockenrohddichte, Trockensubstanzdichte, permanenter Welkepunkt, Feldkapazität und Feinanteilgehalt (Ton + Feinschluffgehalt) und dem daraus abgeleiteten Versickerungsparameter  $\lambda$  beschrieben. Gleiche Bodenschichten werden zu Horizonten zusammengefaßt.

In der eindimensionalen Version erfolgt die Simulation für Teilflächen, die hinsichtlich der Angaben zu Startwerten, physikalischen Bodenparametern, Wetter- und Bewirtschaftungsdaten als homogen angesehen werden können.

Bei der Quantifizierung der Startwerte wird im Hinblick auf Bodentemperatur und Bodenfeuchte von Standardannahmen ausgegangen. Organische Substanz und

Mineralstickstoff werden auf der Basis experimenteller Untersuchungen eingestellt. Wo dies nicht möglich ist, werden die Zustandsgrößen abgeschätzt und im Verlauf der Simulation durch anfallende Meßwerte angepaßt.

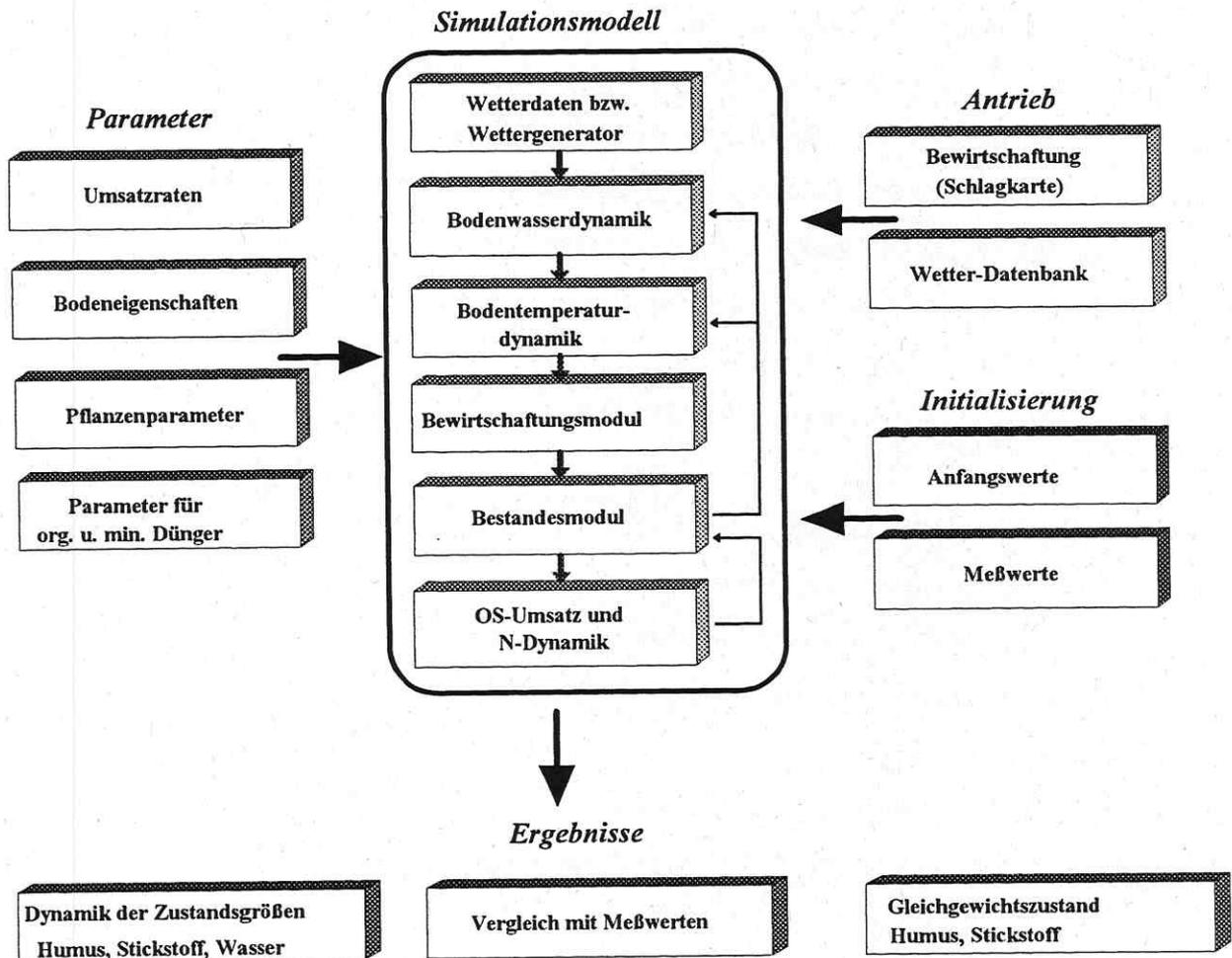


Abb. 2.1: Aufbau des Simulationssystems CANDY

Die zum Standardsystem gehörende Bedieneroberfläche ermöglicht eine einfache Arbeit mit dem Simulationssystem, da alle wesentlichen Funktionen zur Dateneingabe, Simulationsdurchführung und Ergebnisauswertung über eine leicht zu erlernende Menüsteuerung zu erreichen sind. Diese Bedieneroberfläche wird ebenfalls benutzt, um die Maßnahmen für das GIS-gestützte System zu verarbeiten. Die Standortdaten werden beim GIS-System über einen speziellen Mechanismus bereitgestellt (vgl. Pkt. 4).

## 2.2. Modellierung der Bodenprozesse

### 2.2.1. C-N-Dynamik

Im Modell CANDY wird die Kohlenstoff (C)-Stickstoff (N)-Dynamik im Bodenabschnitt von der Oberfläche bis in eine Tiefe von 2 m betrachtet. In diesem Bereich liegt der Wurzelraum der wichtigsten Kulturpflanzen, deren Beitrag an den Stoffumwandlungs- und Transportprozessen für eine Modellierung von Agrarökosystemen unerlässlich ist. Auch ein großer Anteil der Mikroorganismenaktivität ist in diesem oberen Bodenabschnitt lokalisiert.

Grundlage des Modells ist die enge Kopplung des C- und N-Kreislaufes im Boden. Dem C-Kreislauf kommt dabei die Schlüsselrolle zu, da durch ihn die Energie für eine Vielzahl mikrobieller Umsatzprozesse bereitgestellt wird.

Im Modell wird die organische Bodensubstanz in verschiedene Pools aufgeteilt, die sich in ihren Eigenschaften und zulässigen Umwandlungsreaktionen unterscheiden. So wird die Menge organischer Substanzen (OS) im Boden entweder der organischen Bodensubstanz (OBS) oder der organischen Primärschubstanz (OPS) zugeordnet. Der OPS-Pool enthält alle organischen Dünger sowie Ernte- und Wurzelrückstände. Die OBS ist aus der OPS durch mikrobielle Umsatzprozesse entstanden. Sie wird in einen inerten und einen umsetzbaren Pool gegliedert, wobei der inerte Anteil in den Betrachtungen des OS-Umsatzes unberücksichtigt bleibt. Die umsetzbare Form teilt sich wiederum in den Pool der aktiven organischen Substanz (AOS) und in den der stabilisierten Form (SOS). Beide unterscheiden sich in den Zeitkonstanten ihrer Autolyse sowie in der Reaktionsabfolge bezüglich der Nähe zum OPS-Pool.

In Abb. 2.2 ist der Zusammenhang der einzelnen Fraktionen der organischen Substanz graphisch veranschaulicht.

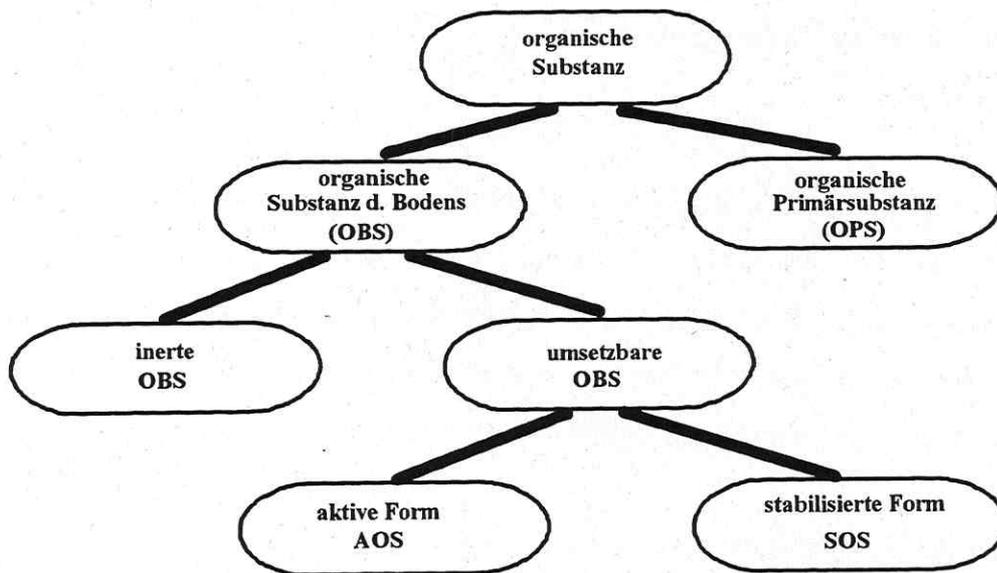


Abb. 2.2: Zusammenhang der einzelnen Fraktionen der organischen Substanz im Modell CANDY

Der Bodenstickstoff wird im Modell in den durch das C/N-Verhältnis bestimmten organischen Anteil sowie den anorganischen Anteil Nitrat-N und Ammonium-N unterschieden.

Zustandsgrößen im C-N-Modul zu CANDY sind die Kohlenstoffkonzentrationen in den Pools AOS und SOS, Nitrat-N und Ammonium-N für 20 als homogen angenommene 10 cm dicke Bodenschichten sowie bis zu 6 verschiedene Arten von OPS.

Folgende Teilprozesse sind im Modell abgebildet:

- **Abbau und Umsatz der OS**

Die Beschreibung erfolgt im Modell durch die Vorgabe der C-Reaktionen, die N-Reaktionen sind durch das spezifische C/N-Verhältnis der betrachteten OS-Fraktion automatisch an diese gekoppelt. Die C-Umsatzprozesse werden generell als Kinetiken 1. Ordnung angesetzt, s. folgendes Gleichungssystem (2.1):

$$\begin{aligned}
 \frac{dC_{OPS}(t)}{dt} &= -k_{OPS} C_{OPS}(t) \\
 \frac{dC_{REP}(t)}{dt} &= \eta k_{OPS} C_{OPS}(t) \\
 \frac{dC_{AOS}(t)}{dt} &= \frac{dC_{REP}(t)}{dt} - (k_m + k_s)C_{AOS}(t) + k_a C_{SOS}(t) \\
 \frac{dC_{SOS}(t)}{dt} &= k_s C_{AOS}(t) - k_a C_{SOS}(t)
 \end{aligned} \tag{2.1}$$

mit

t: Zeit (d)

$C_{AOS}$ ,  $C_{SOS}$ ,  $C_{OPS}$ : Kohlenstoffmengen der OS-Fractionen ( $\text{kg C ha}^{-1}$ )

$C_{REP}$ : reproduktionswirksamer Kohlenstoff ( $\text{kg C ha}^{-1}$ )

$\eta$ : Synthesekoeffizient

$k_{ops}$ ,  $k_m$ ,  $k_a$ ,  $k_s$ : Reaktionskoeffizienten ( $\text{kg C ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$ ).

Neben Abbau- und Austauschprozessen der OBS-Fractionen beschreibt (2.1) auch den Reproduktionsfluß ( $C_{REP}$ ) in die OBS. Dieser Reproduktionsfluß ist Ergebnis des OPS-Umsatzes und wird durch den für jede OPS-Fraktion charakteristischen Wert des Synthesekoeffizienten  $\eta$  bestimmt.

Behandelt man das System (2.1) in der Kalenderzeit, so sind die Reaktionskoeffizienten von Umwelteinflüssen wie Temperatur und Bodenfeuchte abhängig. Die Verringerung der Reaktionsintensität im Vergleich zu optimalen Bedingungen wird durch sogenannte Reduktionsfunktionen ausgedrückt. Bei Bezugnahme auf eine biologische Zeitbasis (siehe unten) nehmen diese Reaktionskoeffizienten konstante, für die jeweilige Fraktion charakteristische Werte an, die der Reaktion bei optimalen Umsatzbedingungen entsprechen. Die Reduktionsfunktionen werden dann benutzt, um die Transformation von der Kalenderzeit zur biologischen Zeitbasis durchzuführen. In der Reduktionsfunktion R sind der Einfluß von Bodentemperatur und -feuchte sowie der Durchlüftungsstress auf die Umsatzreaktionen abgebildet:

$$R(x, t) = R(T, \theta, E_L) = r_T(T) r_w(\theta) r_L(E_L) \quad (2.2)$$
$$0 \leq R(x, t); r_T(T); r_w(\theta); r_L(E_L) \leq 1$$

mit

t: Zeit

T: Bodentemperatur

$\theta$ : volumetrische Bodenfeuchte

$E_L$ : Bodenluftvolumen

x: Tiefe (cm)

$r_T$ : Temperatur-Responsefunktion

$r_w$ : Feuchte-Responsefunktion

$r_L$ : Durchlüftungs-Responsefunktion.

Der Temperatureinfluß  $r_T$  auf die Reaktionskoeffizienten läßt sich nach FRANKO (1989) durch

$$r_T(T) = Q^{(T-35)/10} \quad \text{für } T \leq 35, \text{ sonst } 1 \quad (2.3)$$

mit T: Bodentemperatur in °C  $Q=2.1$  (VANT'HOFF-Konstante)

beschreiben.

Der Einfluß der Bodenfeuchte auf die Umsatzaktivität wird in zwei Komponenten gegliedert. Eine Komponente beschreibt die stimulierende Wirkung der Bodenfeuchte. Die zweite Komponente beschreibt den durch die Bodenfeuchte vermittelten Einfluß der Durchlüftung des Bodens.

Der Term zur Beschreibung des Feuchteeinflusses  $r_w$  wird nach FREYTAG und LÜTTICH (1985) angesetzt:

$$r_w(\theta) = \begin{cases} 4 \frac{\theta}{PV} \left(1 - \frac{\theta}{PV}\right) & \text{für } \frac{\theta}{PV} \leq 0.5 \\ 1 & \text{für } \frac{\theta}{PV} > 0.5 \end{cases} \quad (2.4)$$

mit

$r_w$ : Feuchte-Responsefunktion     $\theta$ : volumetrische Bodenfeuchte  
 PV: Porenvolumen.

Die Abhängigkeit der mikrobiellen Umsatzprozesse von der Aeration des Bodens hat eine Dämpfung der Umsatzaktivität in tieferen Bodenschichten zur Folge. Dieser Effekt ist um so stärker, je schlechter die Bedingungen für einen Luftaustausch zwischen Boden und Atmosphäre werden. Zur Beschreibung dieses dämpfenden Einflusses  $r_L$  in Abhängigkeit vom Bodenluftvolumens  $\varepsilon_L$  wurde folgender Ansatz gewählt (FRANKO, 1989):

$$r_L = \exp \left( -x \sqrt{\frac{S \cdot r_T(T) \cdot r_w(\theta)}{\varepsilon_L (\varepsilon_L - \varepsilon_p)}} \right) \quad (2.5)$$

mit

$x$ : Bodentiefe (cm);     $\varepsilon_L$ : relatives Luftvolumen  
 S: standortspezifischer Parameter (abhängig vom Feinanteil des Bodens)  
 $\varepsilon_p$ : relatives "pocket"-Volumen (Konstante).

#### • Abschätzung des fruchtfolgetypischen Humusniveaus

Die Prozesse des Umsatzes der organischen Bodensubstanzen verlaufen gegenüber den Zeitspannen in der Größenordnung eines Tages relativ 'langsam'. Unter diesem Gesichtspunkt können die Schwankungen von Bodentemperatur und -feuchte innerhalb eines Tages vernachlässigt werden. Als Folge dieser quasistationären Betrachtungsweise sind auch die Reduktionsfunktionswerte in (2.2) als konstant anzusehen.

Unter dieser Voraussetzung kann man in (2.1) zu einer neuen, 'biologischen' Zeitbasis  $t^*$  nach

$$t^* = t R \quad (2.6)$$

mit R: Reduktionsfunktionsansatz nach (2.2)

übergehen. Diese neue Zeitbasis wird als 'wirksame Mineralisierungszeit (WMZ)' (KARTSCHALL, 1986) bezeichnet, da in ihr die Umsatzreaktionen unter konstanten Optimalbedingungen ablaufen. Bezeichnet man in diesem transformierten Gleichungssystem die Zeitbasis anstelle von  $t^*$  wieder mit  $t$ , so ist das Aussehen von (2.1) formal gleichgeblieben. Anstelle der Reaktionskoeffizienten stehen aber jetzt die konstanten Werte unter Optimalbedingungen. Dieses transformierte, lineare Differentialgleichungssystem mit konstanten Koeffizienten besitzt den Vorteil, daß es sich leicht numerisch auswerten läßt. Gegenstand dieser Betrachtungen ist nur der Kohlenstoff im umsetzbaren Pool der OBS ( $C_{UMS}$ ), der durch Bewirtschaftung und Standortbedingungen bestimmt wird.

Im stationären Zustand gilt nach (2.1):  $\frac{dC_{SOS}}{dt} = 0$  und  $\frac{dC_{AOS}}{dt} = 0$ .

$$\text{Daraus folgt: } C_{SOS} = C_{AOS} * \frac{k_s}{k_a} \quad \text{und} \quad C_{AOS} = \frac{1}{k_m} * \frac{dC_{REP}}{dt}.$$

Es sei  $\xi = \frac{k_s}{k_a}$ . Wegen  $C_{UMS} = C_{AOS} + C_{SOS}$  gilt:  $C_{AOS} = C_{UMS} * \frac{1}{1 + \xi}$  bzw.

$$C_{SOS} = C_{UMS} * \frac{\xi}{1 + \xi}.$$

Unter Berücksichtigung der oben abgeleiteten Zusammenhänge folgt für den umsetzbaren Kohlenstoff im Fließgleichgewicht:

$$C_{UMS} = \frac{1 + \xi}{k_m} * \frac{dC_{REP}}{dt} \quad (2.7)$$

Aus praktischen Erwägungen wird der Fluß  $\frac{dC_{REP}}{dt}$  näherungsweise durch den Quotienten aus dem mittleren jährlichen Anfall an reproduktionswirksamen Kohlenstoff  $C_{REP} = \eta * C_{OPS}$  und der wirksamen Mineralisierungszeit eines Jahres (WMZ) ersetzt

$$C_{UMS} = \frac{1 + \xi}{k_m} * \frac{C_{REP}}{WMZ} \quad (2.8)$$

- **Die Stickstoffmineralisierung**

Die N-Mineralisierung folgt der C-Mineralisierung entsprechend des C/N-Verhältnisses der jeweiligen Fraktionen. Im Fall des OPS-Umsatzes ist zu berücksichtigen, daß neben der OPS-Mineralisierung eine AOS-Synthese stattfindet, die Stickstoff aus dem anorganischen Pool in die AOS-Fraktion überführt. Der resultierende Stickstofffluß setzt sich also aus OPS-Mineralisierung  $N_{\min}$ , N-Immobilisierung durch AOS-Synthese  $N_{\text{im}}$  und AOS-Autolyse  $N_{\text{aut}}$  zusammen:

$$dN/dt = N_{\min} + N_{\text{im}} + N_{\text{aut}} \quad (2.9)$$

mit

$$N_{\min} = k_{\text{OPS}} C_{\text{OPS}} (1/\gamma_{\text{OPS}})$$

$$N_{\text{im}} = -\eta k_{\text{OPS}} C_{\text{OPS}} (1/\gamma_{\text{AOS}})$$

$$N_{\text{aut}} = k_{\text{AOS}} C_{\text{AOS}} (1/\gamma_{\text{AOS}})$$

$\gamma_{\text{OPS}}, \gamma_{\text{AOS}}$ : C/N-Verhältnisse in den einzelnen Fraktionen der OS.

Für eine OPS-Fraktion läßt sich der Netto-N-Fluß in den anorganischen Pool durch den Ausdruck

$$N_{\min} = (1 - \eta \gamma_{\text{OPS}}/\gamma_{\text{AOS}}) k_{\text{OPS}} C_{\text{OPS}} (1/\gamma_{\text{OPS}}) \quad (2.10)$$

beschreiben.

Die Richtung der N-Transformation (Immobilisierung oder Mineralisierung) wird durch das Produkt aus Synthesekoeffizienten  $\eta$  und dem C/N-Verhältnis  $\gamma$  der OPS-Fraktion bestimmt. Dabei können folgende Fälle auftreten:

$\gamma_{\text{OPS}} \eta > \gamma_{\text{AOS}}$	Netto-N-Immobilisierung
$\gamma_{\text{OPS}} \eta = \gamma_{\text{AOS}}$	keine Änderung des $N_{\min}$ -Pools
$\gamma_{\text{OPS}} \eta < \gamma_{\text{AOS}}$	Netto-N-Mineralisierung.

- **Modellierung der gasförmigen Stickstoffverluste**

Gasförmige Stickstoffverluste entstehen durch Ammoniakverflüchtigung und durch Denitrifizierung. Unter der Voraussetzung, daß der Ammonium-Pool wesentlich kleiner als der Nitratvorrat ist, wird die Verflüchtigung im Modell vernachlässigt.

Die Verluste durch Denitrifizierung werden wie folgt berechnet:

$$\text{NO3}_{\text{den}}(t) = k_{\text{den}} \text{NO3}(t) C_{\text{AOS}}(t) R_{\text{den}}(T, \theta) \quad (2.11)$$

mit

NO<sub>3</sub>: Nitratkonzentration (kg N ha<sup>-1</sup>)

t: Zeit (d)

NO<sub>3den</sub>: tägliche Denitrifizierung (kg N ha<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>)

C<sub>AOS</sub>: Kohlenstoffgehalt in der organ. Bodensubstanz (kg C ha<sup>-1</sup>)

k<sub>den</sub>: Reaktionskoeffizient der Denitrifikation

R<sub>den</sub>(T, θ): Reduktionsfunktion (Funktion von Bodentemperatur und -feuchte).

Die Reduktionsfunktion der Denitrifizierung berechnet sich in Abhängigkeit von Bodentemperatur und -feuchte nach

$$R_{\text{den}}(x, t) = r_T(T) r_w^{\text{den}}(\theta) \quad (2.12)$$

mit

r<sub>T</sub>(T): Temperatur-Responsefunktion      r<sub>w</sub><sup>den</sup>(θ): Feuchte-Responsefunktion.

Der Temperaturterm r<sub>T</sub>(T) der Denitrifikation ist mit dem der Mineralisierung (2.3) identisch.

Für den Feuchte-term der Denitrifikation wird der Ansatz

$$r_w^{\text{den}}(\theta) = \begin{cases} \frac{\theta - \theta_{\text{krit}}}{1,627 \theta_{\text{FK}} - 0,0267 \theta_{\text{FK}} \text{ PV}} & \text{für } \theta > \theta_{\text{krit}} \\ 0 & \text{für } \theta \leq \theta_{\text{krit}} \end{cases} \quad (2.13)$$

mit

θ<sub>krit</sub> = 0.627 θ<sub>FK</sub> - 0.0267 θ<sub>FK</sub> PV

θ: volumetrische Bodenfeuchte

θ<sub>FK</sub>: volumetrische Bodenfeuchte bei Feldkapazität

PV: Porenvolumen

verwendet.

#### • Die Umwandlung von Ammonium in Nitrat (Nitrifizierung)

Die Simulation der Nitrifizierung erfolgt nach RITCHIE et al. (1986) auf der Grundlage eines reaktionskinetischen Ansatzes vom MICHAELIS-MENTEN-Typ:

$$N_{\text{nit}} = v_{\text{nit}} \frac{\text{NH}_4}{k_h + \text{NH}_4} \quad (2.14)$$

mit

N<sub>nit</sub>: die täglich in Nitrat umgewandelte N-Menge

k<sub>h</sub>: Parameter

v<sub>nit</sub>: max. Nitrifizierungsgeschwindigkeit

NH<sub>4</sub>: NH<sub>4</sub>-Konzentration

Die Parameterwerte wurden aus dem Modell CERES (RITCHIE et al., 1986) übernommen:  $v_{\text{nit}} = 40 \text{ ppm}/(\text{d R}(x,t))$  und  $k_h = 90 \text{ ppm}$ . Die Berechnung der biologisch wirksamen Zeit (KARTSCHALL, 1986) für die Nitrifizierung erfolgt wie für die Ammonifizierung mittels der Reduktionsfunktion  $R(x, t)$  (Gl. (2.12)).

- **Die Einwaschung von anorganischem Stickstoff in den Boden**

Die Einwaschung von anorganischem Stickstoff in den Boden erfolgt im Modell als Nitrateintrag proportional mit der auftretenden Niederschlagsmenge in Abhängigkeit von der standortspezifischen Immission.

- **Die Verlagerung und Auswaschung von Nitrat-N**

Der Transport des Nitrates im Boden vollzieht sich im Modell gekoppelt an den konvektiven Feuchtetransport (BURNS, 1974):

$$PNO3(x,t) = \beta \frac{P(x,t)}{\theta(x,t) + P(x,t)} NO3(x,t) \quad (2.15)$$

mit

$\beta$ : Parameter

$PNO3(x,t)$ : pro Tag transportierte Nitratmenge am Tag  $t$  in der Tiefe  $x$

$P(x,t)$ : pro Tag perkolierende Wassermenge

$\theta$ : Bodenfeuchte (mm)

$NO3(x,t)$ : Nitratkonzentration.

- **Der Stickstoffentzug durch die Pflanze**

Die Pflanze bildet eine weitere Senke innerhalb des Stickstoffhaushaltes. Der Verlauf der N-Aufnahme über die Vegetationszeit  $N_{\text{PFL}}(t)$  durch die Pflanze wird als "S-förmige" Kurve dargestellt. Dadurch wird eine nahezu gleichförmige N-Aufnahme in der Hauptvegetation simuliert:

$$N_{\text{PFL}}(t) = 0,5 \left[ 1 + \frac{\tanh((2t/V-1)S)}{\tanh(S)} \right] N_{\text{ERT}} \quad (2.16)$$

mit

$N_{PFL}$ : in der Pflanze enthaltener Stickstoff ( $\text{kg N ha}^{-1}$ )

$V$ : pflanzenspezifische Vegetationsdauer (d)

$S$ : Steilheit der Entzugskurve

$t$ : Vegetationszeit (d)

$N_{ERT}$ : Entzugsziel ( $\text{kg N ha}^{-1}$ ).

Die Bestimmung des Parameters  $S$  in Abhängigkeit von der Pflanzenart ist bei FRANKO (1989) beschrieben. Der Entzug wird aus der zum Zeitpunkt insgesamt durchwurzelten Bodensäule realisiert. Die aktuelle Durchwurzelungstiefe wird durch lineare Interpolation aus der fruchartspezifischen maximalen Wurzeltiefe bestimmt. Bis zum Erreichen der maximalen Tiefe wird die Wurzelentwicklung als gleichförmig verlaufender Prozeß dargestellt. Danach bleibt die von den Pflanzen erfaßte Bodenschicht bis zur Ernte konstant.

Der Einfluß der Bodenfeuchte auf den N-Entzug der Pflanze wird so berücksichtigt, daß bei Erreichen bzw. Unterschreiten des permanenten Welkepunktes keine N-Aufnahme mehr erfolgt.

### 2.2.2. Temperaturdynamik

Die Bodentemperatur beeinflusst die Umsatzprozesse der C- und N-Dynamik wesentlich. Deshalb stellt das Temperaturmodul von CANDY Tagesmittelwerte der Bodentemperatur für fortlaufende 10 cm-Schichten von der Erdoberfläche bis zu 2 m Tiefe zur Weiterverwendung bereit. Als Eingabe benötigt es die meteorologischen Beobachtungen der Lufttemperatur sowie die durch das Bodenwassermodul bereitgestellten Bodenfeuchtwerte des aktuellen Tages.

Die physikalische Grundlage des Temperaturmodells von CANDY ist die eindimensionale Wärmeleitungsgleichung

$$\frac{\partial}{\partial t} (C(\theta) T(x,t)) = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda(\theta) \frac{\partial T(x,t)}{\partial x} \right) \quad (2.17)$$

mit

$x$ : Ortskoordinate (Bodentiefe),  $0\text{cm} < x < 200\text{cm}$ , Bodenoberfläche:  $x = 0\text{cm}$

$t$ : Zeit (d),  $0 < t < T$ ,  $T$ : vom Nutzer gewählter Simulationszeitraum

$T$ : Temperatur (K)

$\theta = \theta(x,t)$ : volumetrische Bodenfeuchte (l) des aktuellen Tages (Resultat des Bodenwassermoduls)

$C=C(\theta)$ : Wärmekapazität der Bodenschicht ( $\text{J cm}^{-3} \text{K}^{-1}$ )

$\lambda = \lambda(\theta)$ : Wärmeleitfähigkeit der Bodenschicht ( $\text{J cm}^{-1} \text{s}^{-1} \text{K}^{-1}$ ).

Für eine eindeutige Lösung von (2.17) müssen eine Anfangstemperaturverteilung sowie Randbedingungen an der Erdoberfläche und in 2 m Tiefe vorgegeben werden.

Als Anfangstemperaturverteilung wird am 1. Januar des Simulationsstartjahres ein linearer Verlauf vom aktuellen Tageslufttemperaturwert an der Bodenoberfläche zum Wert 8 °C in 3 m Tiefe als Approximation für das langjährige Lufttemperaturmittel des Standortes angenommen. Daraus werden die Starttemperaturen in den 20 Schichten ermittelt. Erfahrungen mit dem Modell zeigen, daß die angenommenen Werte sich beim Fortgang der Simulation relativ rasch in den wahren Temperaturverlauf einschwingen.

Die Vorgabe der Randbedingungen erweist sich als schwieriger. Die Bodenoberfläche ist eine Phasengrenze, somit kann der vom Wetterdienst gelieferte Mittelwert der Lufttemperatur in 2m Höhe über dem Erdboden nicht als obere Randbedingung verwendet werden. Vielmehr müßte die Aufnahme bzw. Abgabe von Energie durch verschiedenste Vorgänge (Wärmestrahlung, Temperaturleitung, konvektiver Wärmetransport durch Wind u.v.m.) bilanziert werden. Diese Bilanzgleichungen erhielten dann eine große Anzahl unbekannter Parameter, die erst zu bestimmen wären. Außerdem wäre die praktische Verwertbarkeit bei der Verwendung von Winddaten eingeschränkt, da von vielen Standorten keine Windmessungen vorliegen.

Deshalb wurde dem Konzept von SUCKOW (1986) gefolgt, bei dem die Temperatur  $T_{0,5}$  in 5 cm Tiefe als obere Randbedingung gesetzt wird.  $T_{0,5}$  wird als gewichtetes Mittel aus den Lufttemperaturmitteln dreier Tage nach

$$T_{0,5}(t) = K(t) (F_0 T_L(t) + F_1 T_L(t-1) + F_2 T_L(t-2)) \quad (2.18)$$

mit

t: fortlaufende Tagesnummer

$T_{0,5}(t)$ : (konstanter) Wert der Bodentemperatur in 5 cm Bodentiefe am Tag t

$T_L(t)$ : Mittelwert der Lufttemperatur am Tag t

$F_0, F_1, F_2$ : Gewichtsfaktoren in Gleichung (2.18), abhängig von Bodeneigenschaften

$K(t)$ : tagesabhängiger Korrekturfaktor

angesetzt. Die Gewichtsfaktoren  $F_0, F_1$ , und  $F_2$  sind standortabhängig, sie wurden durch Regressionsrechnungen mit vorliegenden langjährigen Meßreihen der Bodentemperatur in 5 cm Tiefe erhalten. Liegen von einem Standort keine langjährigen Meßreihen zur Parametrisierung vor, wurden mit einem Standardparametersatz gute Erfahrungen gemacht.

Der Korrekturfaktor  $K(t)$  wurde postuliert als (AUTORENKOLLEKTIV, 1991)

$$K(t) = a(t) + b(t) K^{BR}(t) \quad (2.19)$$

mit

t: aktuelle Tagesnummer

$K^{BR}(t)$ : Korrekturfaktor für Boden ohne Pflanzenbestand (Brache)

a(t), b(t): zeitabhängige Größen, die vom Pflanzenbestand abhängig sind und in einfacher Weise die Dämpfungswirkung durch den Pflanzenwuchs ausdrücken.

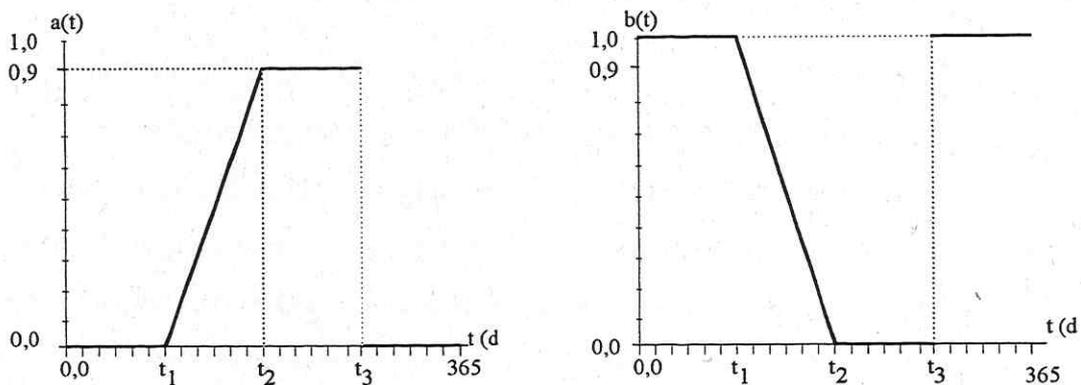
Für  $K^{BR}(t)$  wurde der Ausdruck (AUTORENKOLLEKTIV, 1990)

$$K^{BR}(t) = b_0 + b_1 \cos(\alpha) + b_2 \cos(2\alpha) + a_1 \sin(\alpha) + a_2 \sin(2\alpha) \quad (2.20)$$

mit  $\alpha = \alpha(t) = 2\pi t / 365$

verwendet. Die Größen  $b_0, b_1, \dots, a_2$  stammen aus Regressionsrechnungen (Fourieranalyse) und sind standortabhängig. Falls die konkreten Werte für einen Standort nicht bekannt sind, wird wieder ein Standardparametersatz benutzt. Das führte in allen bisherigen Anwendungen zu akzeptablen Ergebnissen.

Die den Einfluß des Pflanzenbestandes auf die Temperatur  $T_{0,5}(t)$  beschreibenden Funktionen a(t) und b(t) aus (2.19) orientieren sich an wichtigen Wachstumsstadien der Pflanzen (mittlere Werte) sowie aktuellen agrotechnischen Maßnahmen (Aufgang, Ernte). Sie wurden stückweise linear angesetzt, ihre Definitionen sind aus Abb. 2.3 ersichtlich.



<p><math>t_1</math> : Beginn der Bestandswirkung</p> <p><math>t_2</math> : maximaler Bedeckungsgrad erreicht</p> <p><math>t_3</math> : Erntetermin</p>
--

Abb. 2.3: Dämpfungseinflußfunktionen des Pflanzenbestandes im Korrekturfaktor  $K(t)$

Die untere Randbedingung für (2.17) wird in der Tiefe  $x = 200$  (cm) durch

$$\frac{\partial T}{\partial x}(200, t) = 0 \quad (2.21)$$

festgelegt. Gleichung (2.21) besagt, daß kein Wärmefluß durch die Schicht  $x = 200$  (cm) stattfindet. Durch diese Forderung wird vermieden, die Temperatur in dieser Tiefe als Randbedingung vorzugeben, da sie im allgemeinen unbekannt ist.

Nach der Festlegung der Anfangs- und Randbedingungen sind in Gl. (2.17) noch die die Wärmeleitung beeinflussende Funktionen  $C(\theta)$  und  $\lambda(\theta)$  zu spezifizieren:

$$\lambda(\theta) = \frac{(1,26\rho_T - 0,71)10^{-2}}{1 + (11,5 - 5,0\rho_T) \exp(-50,0 \left(\frac{\theta}{\rho_T}\right)^{1,5})} \quad (\text{J cm}^{-1} \text{ s}^{-1} \text{ K}^{-1}) \quad (2.22)$$

$$C(\theta) = \rho_T c_S + \theta C_W \quad (\text{J cm}^{-3} \text{ K}^{-1}) \quad (2.23)$$

mit

$\theta = \theta(x, t)$ : volumetrischer Wassergehalt (l)

$\rho_T$ : Trockenrohddichte des Bodens, ( $\text{g cm}^{-3}$ )

$c_S$ : spezifische Wärme der festen Bodenbestandteile ( $\text{J g}^{-1} \text{ K}^{-1}$ )

$C_W$ : Wärmekapazität von Wasser,  $C_W = 4,1366 \text{ J cm}^{-3} \text{ K}^{-1}$ .

Da der Bodenwassermodul für jeden Simulationstag pro Bodenschicht einen aktuellen Wert von  $\theta$  liefert, ist eine Auswertung von (2.17) in Tagesschritten notwendig. Obwohl die Randbedingungen zu (2.17) tagesweise konstant sind, muß wegen der beliebigen Gestalt der Vortageswerte der Bodentemperatur die Berechnung durch ein numerisches Verfahren erfolgen. Die Entscheidung fiel für ein finites Differenzenverfahren, das auf einem äquidistanten Gitter von 10 cm in Ortsrichtung sowie 0,5 d in Zeitrichtung angesetzt wurde. Die Approximation der partiellen Ableitungen erfolgte in Ortsrichtung in durch zentrale Differenzen, in Zeitrichtung durch rückwertige Differenzen (s. z.B. PATANKAR, 1976). Zur Berechnung der Bodentemperaturverteilung des aktuellen Tages muß zweimal ein lineares Gleichungssystem mit Tridiagonalstruktur gelöst werden (s. z.B. SCHWARZ, 1988).

### 2.2.3. Wasserdynamik

Die Umsatz- und Transportprozesse der C- und N-Dynamik im Boden werden durch den Umweltfaktor Bodenfeuchte sowie die Wasserbewegung wesentlich beeinflusst. Im Bodenwassermodul von CANDY werden diese wichtigen Größen aus meteorologischen Daten errechnet. Das Modell ist eindimensional in Ortsrichtung (Tiefenvariable  $x$ ). Es betrachtet den Bodenabschnitt von der Erdoberfläche ( $x = 0$  cm) bis in eine Tiefe von 2m ( $x = 200$  cm), gedanklich aufgeteilt in 20 homogene Bodenschichten von 10 cm Dicke. Zustandsvariablen sind in diesem Modul die volumetrische Bodenfeuchte in den betrachteten Schichten sowie, falls vorhanden, interzeptiertes Niederschlagswasser im Pflanzenbestand oder das Wasseräquivalent einer aufliegenden Schneedecke.

Die Modellgrundlagen gehen wesentlich auf KOITZSCH (1990) zurück.

Die hydrologischen Prozesse werden auf der Basis eines Kapazitätskonzeptes betrachtet, wonach eine abwärts gerichtete Wasserbewegung nur durch Überschreiten des schichtspezifischen Feldkapazitätswertes in der Bodenfeuchte möglich wird. Ein Wasseraufstieg kann einzig durch die Prozesse von Evaporation und Transpiration für Bodenfeuchten oberhalb des permanenten Welkepunktes erfolgen.

Der Modul berücksichtigt folgende Teilprozesse:

- Versickerung von Bodenwasser durch Gravitationkräfte (GLUGLA, 1969), modelliert durch folgende Differentialgleichung:

$$\frac{dW}{dt} = -\gamma (W - W_{FK})^2 \quad W \geq W_{FK} \quad (2.24)$$

mit

t: Zeit (d)

W: Wassergehalt (mm) der betrachteten Bodenschicht

$W_{FK}$ : Wassergehalt dieser Schicht bei Feldkapazität (mm)

$\gamma$ : Versickerungsparameter ( $\text{mm}^{-1} \text{d}^{-1}$ ).

- Interzeption von Niederschlagswasser durch den Pflanzenbestand in Abhängigkeit von der Bestandeshöhe (KOITZSCH u. GÜNTHER, 1990):

$$C_i = 2,5 \varepsilon h_{pl} \quad (2.25)$$

mit

$C_i$ : Interzeptionskapazität (mm)       $h_{pl}$ : Bestandeshöhe (cm)  
 $\varepsilon$ : Anteil der mit interzeptionsfähigen Pflanzen bedeckten Bodenoberfläche

- Berechnung der potentiellen Evaporation und deren Reduktion auf den aktuellen Tageswert nach einem modifizierten TURC-Ansatz (KOITZSCH, 1990):

$$E_p = \begin{cases} 0,0041(T_L + 22,7)(G + 2,09) & \text{für } E_p \geq 0,5 \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$
$$ET_p = \min(1 + 0,004 h_{pl}; 1,4) E_p \quad (2.26)$$
$$EI_p = 1,3 E_p$$

mit

$T_L$ : aktuelle Lufttemperatur (°C)       $G$ : aktuelle Globalstrahlung (MJ m<sup>-2</sup>)  
 $E_p$ : Kesselverdunstung (mm d<sup>-1</sup>)       $ET_p$ : potentielle Evapotranspiration (mm d<sup>-1</sup>)  
 $h_{pl}$ : Bestandeshöhe (cm).  
 $EI_p$ : potentielle Verdunstung von interzeptiertem Wasser im Pflanzenbestand (mm d<sup>-1</sup>).

Der aktuelle Wert der täglichen Verdunstung  $ET_a$  (mm d<sup>-1</sup>) ergibt sich als die folgende Summe (KOITZSCH u. GÜNTHER, 1990):

$$ET_a = 0,5 \min(EI_p, R_i) + \psi H_1 \max(0, (1 - R_i / EI_p) ET_p) + (1 - \psi) H_2 E_p \quad (2.27)$$

mit

$R_i$ : interzeptierter Niederschlag im Bestand (mm)  
 $\psi$ : Bedeckungsgrad mit transpirationsfähigen Pflanzen  
 $H_1, H_2$ : Reduktionsterme (KOITZSCH et al., 1980), entstehen aus bodenfeuchte- und tiefenabhängiger Aufteilung des potentiellen Transpirationsanspruchs.

Der erste Summand beschreibt den Beitrag der Interzeptionswasserverdunstung, der zweite den Transpirationsanteil und der letzte die reine Bodenverdunstung.

Die Tiefenabhängigkeit der Reduktion potentieller Verdunstungsansprüche wird durch folgende Entzugsdichtefunktion beschrieben (KOITZSCH, 1977; KOITZSCH et al., 1980):

$$g(x) = g_0 \frac{1 - x / x_u}{1 + \zeta x / x_u} \quad (2.28)$$

mit

$x$ : Bodentiefe ( $0 \leq x \leq x_u$ )       $g_0$ : Normierungskonstante (Dichteintegral 1)  
 $x_u$ : aktuelle Wurzeltiefe (cm) bei Transpiration oder 40 cm bei Evaporation  
 $\zeta$ : Parameter (für Transpiration und Evaporation verschieden),  $-1 \leq \zeta$ .

- Schneeakkumulation und Tauen (KOITZSCH und GÜNTHER, 1990):

Im Modell werden Niederschläge bei Lufttemperaturen kleiner/gleich  $0,5\text{ °C}$  als Schneefälle gewertet. Sie akkumulieren sich in einem Pool. Bei einer vorhandenen Schneedecke und Lufttemperaturen größer als  $0,5\text{ °C}$  wird unter Berücksichtigung des fühlbaren Wärmestroms, des latenten Wärmestroms (Evaporation/Kondensation von Wasserdampf in der Schneedecke) sowie der Wärmeabgabe (durch Abkühlung flüssiger Niederschläge auf die postulierte Schneedeckentemperatur  $0\text{ °C}$ ) die abschmelzende Wassermenge berechnet.

Das Frieren und Tauen des Bodens wird im Modell nicht abgebildet.

- Einfluß eines Pflanzenbestandes:

Dieser Einfluß ist im Bodenwassermodul durch zwei zeitveränderliche Bedeckungsgrade (bezüglich der Transpirationsfähigkeit sowie der Interzeptionsfähigkeit) und die aktuelle Durchwurzelungstiefe abgebildet. Der Verlauf ist fruchtartenspezifisch und durch stückweise lineare Ansätze gekennzeichnet, die bestimmten Pflanzenentwicklungsstadien entsprechen. Für die Dauer der verschiedenen Wachstumsabschnitte des Pflanzenbestandes werden mittlere Werte benutzt, die in das reale Aufgang-Ernte-Zeitintervall eingepaßt werden.

Die im Modul abgebildeten Prozesse werden für jeden Simulationstag sequentiell nach folgendem Schema berücksichtigt:

### **Berechnung der Wasserzufuhr in den Boden**

- bei vorhandenem Pflanzenbestand: Interzeption vom Niederschlag subtrahieren
- bei Lufttemperatur  $\leq 0,5$  °C: Niederschlag zur Schneedecke addieren



### **Berechnung der Evapotranspiration**

- potentielle Werte für Interzeptionsverdunstung, Transpiration und Evaporation aus meteorologischen Eingabegrößen Lufttemperatur, Niederschlag und Globalstrahlung berechnen
- aktuelle Werte der Verdunstung:
  - potentiellen Anspruch zuerst an interzeptiertem Wasser befriedigen
  - falls Restansprüche bleiben, wird zuerst die Evaporation und anschließend die Transpiration im Rahmen der Bodenwasservorräte realisiert



### **Berechnung der Versickerung von Bodenwasser**

- nur für Wassergehalt über dem Feldkapazitätswert
- Berechnungsreihenfolge: sukzessive jede Bodenschicht, beginnend mit der Bodenoberfläche



### **Ausgabe der Ergebnisse des aktuellen Tages**

- Bodenfeuchtwerte in allen 20 Schichten, Versickerung in Tiefe  $> 2$  m
- aktuelle Werte des Interzeptionswasserspeichers und der Schneedecke (wenn vorhanden)

*Abb.: 2.4: Schema der im Wassermodule abgebildeten Prozesse für jeden Simulationstag*

## **2.3. Witterungsmodellierung**

### **2.3.1. Synthetische Wetterdaten**

Die Komplexität der im Boden ablaufenden Prozesse macht es häufig erforderlich, zu ihrer Beschreibung und für Vorhersagen Simulationsmodelle zu verwenden. Witterungsgrößen stellen dabei wichtige Modelleingangsgrößen dar, da sie über die Bodentemperatur und -feuchte die Bedingungen für Umsatz- und Transportprozesse festlegen. Der Witterungseinfluß ist eine wesentliche Ursache für die Variabilität sowohl der Bodenzustandsgrößen, als auch der sie abbildenden Simulationsergebnisse. Die vom jahreszeitlichen Gang abweichenden

Schwankungen der Witterung können als zufällig aufgefaßt und durch statistische Verfahren beschrieben werden.

Für standortbezogene Bewertungen mit Hilfe von Simulationsmodellen ist die witterungsbedingte Variabilität der Ergebnisse unerwünscht. Es müssen hinreichend viele Simulationen über die Zeitspanne jeweils eines Jahres durchgeführt werden, um genügend Werte für eine statistische Analyse (Mittelwertbildung, Berechnung der empirischen Verteilungsfunktionen) zu erhalten. Längere Simulationszeiträume ergeben sich ferner bei langsam veränderlichen Bodengrößen, da für eine Einschätzung des Endzustandes der Einfluß unzureichend bekannter Simulationsstartwerte ausgeschaltet werden muß.

Leider fehlen im allgemeinen diese benötigten langen Datenreihen. Die alleinige Verwendung von bekannten Mittelwerten (Monatsmittel, Jahresmittel) der Witterung oder eines 'mittleren' Jahres der Witterung stößt dagegen auf Grenzen, da die im Boden ablaufenden Prozesse in der Regel nichtlinear sind und die auf diese Weise erhaltenen Ergebnisse keine Mittelwerte der interessierenden Bodengrößen darstellen.

Somit ist es mitunter günstig, mit Hilfe eines statistischen Modells ('Wettergenerator') beliebig viele Ausspielungen von Witterungsabläufen zu erzeugen und den Bodensimulationsmodellen zur Verfügung zu stellen. Als Beispiele für solche Generatoren sollen RICHARDSON u. NICKS (1990), und RACSKO et al. (1991) erwähnt werden.

Der Wettergenerator wird mit Hilfe von Wetterbeobachtungen parametrisiert, um ihn an die speziellen Gegebenheiten des Standortes anzupassen. Als Faustregel sollten dafür über mindestens 15 Jahre Wetteraufzeichnungen vorliegen. Falls weniger Wetterdaten vorhanden sind, lassen sich gegebenenfalls die Generatorparameter von Stationen mit ähnlichem Klima verwenden oder mit Hilfe von Zusatzinformationen abändern.

Auf folgenden Gebieten erscheint die Anwendung synthetischer Witterungsdaten als nützlich und legitim:

- zur Abschätzung standorttypischer Werte von Bodengrößen, die komplex und nichtlinear von der Tageswitterung abhängen, falls nur in beschränktem Umfang Wetterdatenmaterial vorliegt
- zum Ersatz fehlender Abschnitte oder Elemente in Klimaaufzeichnungen für Simulations-

rechnungen zu Feldversuchen

- für Modellrechnungen über die Auswirkung prognostizierter Klimaverschiebungen auf den Bodenzustand und die im Boden ablaufenden Prozesse durch Manipulationen an den Wettergeneratorgrößen.

Die folgenden Ausführungen beziehen sich konkret auf das Simulationsprogramm CANDY, welches Tagesmittel der Lufttemperatur (LTEM) und der Globalstrahlung (GLOB) sowie die Tagesniederschlagsmenge (NIED) als Input benötigt.

Die Modellgrundlagen des Wettergenerators werden am Beispiel des Standortes Bad Lauchstädt unter Verwendung von Witterungsaufzeichnungen von 1958-91 vorgestellt. Die verwendeten GLOB-Werte wurden aus Beobachtungen der täglichen Sonnenscheindauer mit einer Formel vom Angström-Typ nach KOITZSCH u. KLANK (1990) errechnet. Nur Niederschlagsmengen größer/gleich 0,2mm wurden als Niederschlagsereignis berücksichtigt.

### **2.3.2. Die Modellierung der einzelnen Witterungselemente**

Die Modellierung der drei Witterungsgrößen LTEM, NIED und GLOB sollte folgende allgemein bekannte Fakten berücksichtigen:

- den jahreszeitlichen Gang (sogenannter saisonaler Trend) dieser Größen, der von unregelmäßigen Abweichungen überlagert ist und
- die gegenseitigen Abhängigkeiten innerhalb und zwischen den drei Größen zu gleichen oder vorhergehenden Terminen (Tagen).

Allen diesen Tatsachen kann eine Modellierung der Witterungselemente als stochastische Prozesse gerecht werden.

Für die weitere Auswertung wird nun (schwache) Stationarität der Tageswerte von LTEM, NIED und GLOB über die Jahre und innerhalb eines Jahres für jeweils einen Monat gefordert (s. z.B. PIEHLER, 1990), wodurch die Witterungsdaten von ein- und demselben Monat über alle Jahre als wiederholte, abhängige Beobachtungen von Zufallsgrößen mit der gleichen Verteilung angesehen werden können. Mit Hilfe monatsweise konstanter Mittelwerte wird der saisonale Trend in den Witterungsgrößen berücksichtigt. Die Abweichungen von diesen Mittelwerten werden als zufällige Schwankungen aufgefaßt.

Die Poolung zu Monatswerten erwies sich für die üblichen Genauigkeitsanforderungen bei der Analyse von Agrarökosystemen als ausreichend.

Auf Grundlage dieser Annahme und des vorhandenen Witterungsdatenmaterials muß als erster Modellierungsschritt für jede Größe ein passender Wahrscheinlichkeitsverteilungstyp gefunden und dieser anschließend parametrisiert werden. Die Wahl blieb grundsätzlich auf Verteilungen mit zwei unbekanntem Parametern beschränkt, um den Umfang des Parametersatzes für den Wettergenerator so klein wie möglich zu halten.

Tab. 2.1: Empirische Korrelationskoeffizienten der Witterungselemente, monatsweise gepoolt

Monat	Monatsweise gepoolte empirische Korrelationskoeffizienten zwischen		
	LTEM u. NIED	GLOB u. NIED	LTEM u. GLOB
1	0,12	-0,15	0,04
2	0,05	-0,16	0,00
3	0,02	-0,19	0,11
4	-0,09	-0,28	0,28
5	-0,09	-0,28	0,41
6	-0,14	-0,28	0,51
7	-0,10	-0,23	0,50
8	-0,12	-0,24	0,44
9	-0,03	-0,21	0,25
10	-0,08	-0,20	0,28
11	0,04	-0,12	0,08
12	0,14	-0,10	-0,06

Die gegenseitigen, statistischen Abhängigkeiten innerhalb und zwischen den Witterungsgrößen werden sich in sogenannten Auto- und Kreuzkorrelationswerten niederschlagen. Das Auftreten dieser zum Teil starken Korrelationen muß in der statistischen Auswertung des Beobachtungsmaterials berücksichtigt werden.

In Tab.2.1 sind die (ohne Berücksichtigung der Auto- und Kreuzkorrelationen monatsweise berechneten) empirischen Korrelationskoeffizienten für LTEM, NIED und GLOB dargestellt. Die Vorzeichen dieser Schätzwerte entsprechen den theoretischen Erwartungen, die Beträge jedoch können wegen der Annahme monatsweiser Stationarität und Vernachlässigung der Auto- und Kreuzkorrelationen nur als grobe Anhaltspunkte dienen. Entsprechend den betragsmäßig relativ geringen Korrelationen zwischen LTEM und NIED sowie GLOB und

NIED wird die Niederschlagsmodellierung von einer gemeinsamen Behandlung der restlichen zwei Größen abgekoppelt.

- **Die Modellierung des Niederschlagsprozesses**

Die NIED-Modellierung betrifft zunächst die Entscheidung, ob am gegebenen Tag überhaupt Niederschlag fällt. Im positiven Fall ist anschließend noch die Niederschlagsmenge zu bestimmen.

Bei der Auswertung vorliegender Niederschlagsdatenreihen wurde ersichtlich, daß auf Tage mit Niederschlag mit größerer Wahrscheinlichkeit wieder Tage mit Niederschlag folgen. Ein sehr einfaches Modell, welches eine statistische Abhängigkeit eines Zustandes von dem des Vortages berücksichtigt, ist die homogene MARKOV-Kette 1. Ordnung. Sie wurde zur Entscheidung über 'trockene' oder 'feuchte' Tage für den Wettergenerator angewendet. Die Zufallsgröße 'Niederschlag ja/nein' ist mit der Vorgabe der sogenannten Übergangswahrscheinlichkeiten

$$\begin{aligned} p_{01} & \text{ (auf einen trockenen Tag folgt ein feuchter Tag)} \\ p_{10} & \text{ (auf einen feuchten Tag folgt ein trockener Tag)} \end{aligned} \quad (2.29)$$

beschrieben. Die Größen  $p_{01}$  und  $p_{10}$  werden aus den Verhältnissen der einzelnen Übergänge beim realen Datenmaterial berechnet. Das entspricht der Schätzung nach dem Maximum-Likelihood-Prinzip. Als Starttag des ersten Jahreganges mit synthetischer Witterung wird der 1. Januar angenommen. Für diesen Termin ist die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Niederschlag aus den Wetterbeobachtungen zu schätzen und anzugeben.

Bei der Auswahl einer geeigneten Wahrscheinlichkeitsdichte für die Niederschlagsmenge an Tagen mit Niederschlag mußte die starke Schiefe der Verteilung berücksichtigt werden. In Abb.2.5 ist als Beispiel dafür die empirische Häufigkeitsverteilung der Niederschlagsmengen größer/gleich 0,2 mm Wasser im Monat Mai von 1958-91 in Bad Lauchstädt dargestellt.

Aus der Menge stetiger Wahrscheinlichkeitsdichten mit zwei frei wählbaren Parametern wurde die WEIBULL-Verteilung

$$f_Y(x) = \alpha \beta x^{\beta-1} \exp(-\alpha x^\beta) \quad x > 0, \alpha > 0, \beta > 0 \quad (2.30)$$

zur Beschreibung der empirischen Verteilung der monatstypischen Tagesniederschlagsmenge (an Tagen mit NIED>0) verwendet (REICH, 1985).

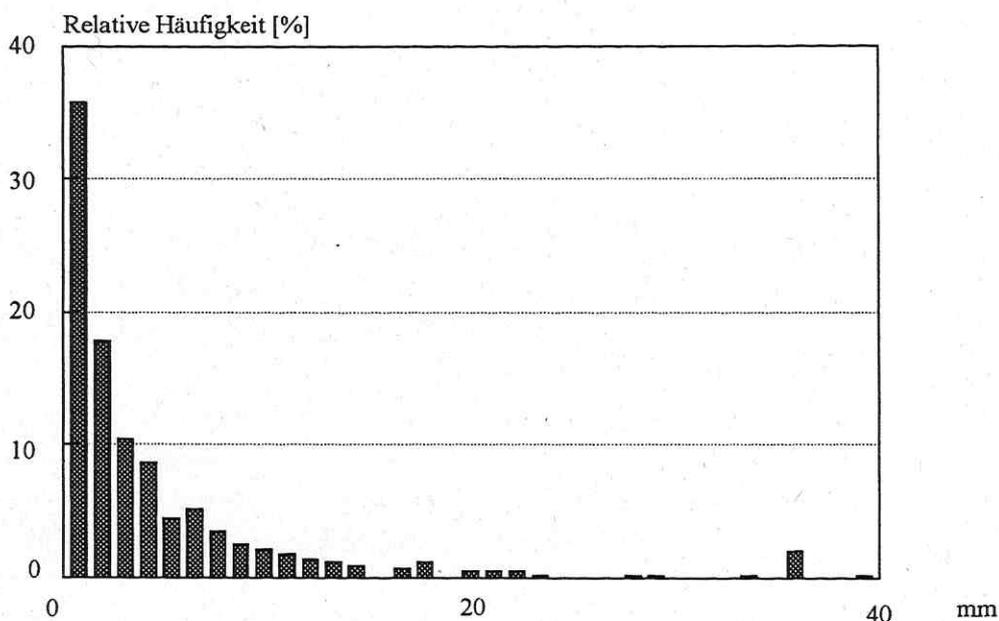


Abb. 2.5: Relative Häufigkeit der Niederschlagsmengen für den Monat Mai in Bad Lauchstädt von 1958-91

Alternative Möglichkeiten sind beispielsweise in STERN u. COE, 1984, BUIHAND, 1978 oder SMITH.u. SCHREIBER, 1974 aufgezeichnet. Die Schätzung der zwei Verteilungsparameter  $\alpha$  und  $\beta$  erfolgte durch das Maximum-Likelihood-Prinzip.

Zusammenfassend wurde die Größe NIED durch

$$NIED_t = M_t \cdot Y_t \tag{2.31}$$

mit

$NIED_t$  : Niederschlagsmenge am Tag  $t$  in mm

$M_t$ : Eintritt eines Niederschlagsereignisses (monatsweise homogene MARKOV-Kettenwerte)

$M_t=0$  : kein Niederschlag,  $M_t=1$ : Tag mit Niederschlag

$Y_t$ : Tagesniederschlagsmenge in mm (für Tage mit  $NIED>0$ )

(unabhängige, monatsweise identisch WEIBULL-verteilte Zufallsgrößen, unabhängig von den MARKOV-Kettenwerten)

modelliert.

### • Die Modellierung von LTEM und GLOB

Für diese beiden Größen erfolgte (ohne Berücksichtigung von Auto- und Kreuzkorrelationen) die monatsweise Berechnung der Verteilungscharakteristika empirische Schiefe und empirischer Exzeß. Beide Werte können als Maße für die Abweichung von einer

Normalverteilung verwendet werden, bei welcher diese (theoretisch) Null sind. In Tab. 2.2 sind die den vorhandenen Witterungsdaten zugrunde liegenden Zahlenwerte aufgeführt. Trotz gewisser Abweichungen bei der Größe GLOB wurde nach Auswertung von Tab. 2.2 eine zweidimensionale Normalverteilung für LTEM und GLOB postuliert.

Tab. 2.2: Empirische Schiefe und empirischer Exzeß der Witterungsgrößen, monatsweise gepoolt

Monat	LTEM		GLOB	
	emp. Schiefe	emp. Exzeß	emp. Schiefe	emp. Exzeß
1	-0,74	0,18	1,46	1,56
2	-0,31	0,25	1,01	0,08
3	-0,28	0,10	0,69	-0,50
4	0,33	-0,02	0,34	-1,08
5	0,06	0,29	0,18	-1,20
6	0,16	-0,50	0,13	-1,20
7	0,32	-0,41	0,15	-1,08
8	0,40	-0,30	0,08	-1,06
9	0,18	-0,36	0,32	-0,98
10	0,00	-0,39	0,68	0,62
11	-0,18	0,07	1,24	0,70
12	-0,60	0,82	1,64	1,73

Die Berücksichtigung der Auto- und Kreuzkorrelationen geschah durch den Ansatz eines vektoriellen auto-regressiven Modelles (RICHARDSON, 1981) für die monatsweise standardisierten LTEM und GLOB-Werte:

$$\begin{pmatrix} LTEMs_t \\ GLOBs_t \end{pmatrix} = A \begin{pmatrix} LTEMs_{t-1} \\ GLOBs_{t-1} \end{pmatrix} + B \begin{pmatrix} e_{1,t} \\ e_{2,t} \end{pmatrix} \quad (2.32)$$

mit

$LTEMs_t$  bzw.  $GLOBs_t$ : standardisierte LTEM- bzw. GLOB-Werte am Tag  $t$

$A, B$ : Matrizen

$\{e_{1,t}\}$  bzw.  $\{e_{2,t}\}$ : unabhängige, standardnormalverteilte Zufallsgrößen.

Die Matrizen  $A$  und  $B$  lassen sich aus den Auto- und Kreuzkorrelationsfunktionswerten von LTEM und GLOB berechnen (vgl. RICHARDSON, 1981):

$$\begin{aligned} A &= M_1 M_0^{-1} \\ B &= M_0 - M_1 M_0^{-1} M_1^{-T} \end{aligned} \quad (2.33)$$

mit

$$M_0 = \begin{bmatrix} 1 & \rho_0(\text{LTEM}, \text{GLOB}) \\ \rho_0(\text{GLOB}, \text{LTEM}) & 1 \end{bmatrix}$$

$$M_1 = \begin{bmatrix} \rho_1(\text{LTEM}, \text{LTEM}) & \rho_1(\text{LTEM}, \text{GLOB}) \\ \rho_1(\text{GLOB}, \text{LTEM}) & \rho_1(\text{GLOB}, \text{GLOB}) \end{bmatrix}$$

$\rho_0(\dots)$  bzw.  $\rho_1(\dots)$ : Kreuzkorrelationswerte zur Zeitdifferenz 0 bzw. 1.

Die Standardisierung erfolgte getrennt für Tage mit Niederschlag und solche ohne Niederschlagsereignis, da zwischen beiden systematische Unterschiede bestehen. Kritisch ist an (2.32) zu vermerken, daß es zu leichten Abweichungen in den Auto- und Kreuzkorrelationswerten für Zeitdifferenzen größer als ein Tag gegenüber den zugehörigen Schätzwerten aus dem Datenmaterial kommt. Die Verwendung komplizierterer Modelle als (2.32) zur besseren Anpassung erscheint angesichts des Ansatzes monatsweise konstanter LTEM- und GLOB-Erwartungswerte nicht sinnvoll. Um mit den Ergebnissen von (2.32) die nichtstandardisierten Größen zu erhalten, werden diese Werte mit der monatstypischen Standardabweichung multipliziert und anschließend zum Monatsmittelwert addiert:

$$\begin{aligned} \text{LTEM}_t &= \text{Monatsmittel} + \text{Monatsstandardabweichung} * \text{LTEMs}_t \\ \text{GLOB}_t &= \text{Monatsmittel} + \text{Monatsstandardabweichung} * \text{GLOBs}_t \end{aligned} \quad (2.34)$$

Die Mittelwerte und Standardabweichungen unterscheiden sich nach obigen Ausführungen für Tage mit oder ohne Niederschlag.

- **Das Ausspielen zufälliger Witterungswerte**

Mit der Festlegung der Übergangswahrscheinlichkeiten, der Parametrisierung aller Wahrscheinlichkeitsverteilungen der Witterungsgrößen sowie nach Berechnung der Hilfsgrößen A und B in Gleichung (2.32) sind alle Voraussetzungen für die Generierung synthetischer Witterung geschaffen.

Die in Gleichung (2.31) und (2.32) auftretenden Zufallsgrößen werden über Zwischenschritte mit dem Generator für (im Intervall zwischen 0 und 1) gleichverteilte Zufallszahlen der verwendeten Programmiersprache TURBO-PASCAL (s. STILLER, 1992) erhalten. Die

verwendeten Transformationsvorschriften für normalverteilte Zufallsgrößen  $Y$  sowie WEIBULL-verteilte Größen  $Z$  lauten (s. HARTUNG, 1991, S. 147 und S. 231):

$$Y = \sqrt{-2 \ln U_1} \cos(2\pi U_2) \quad (2.35)$$

$$Z = \exp\left(\frac{1}{\beta} \ln\left(-\frac{1}{\alpha} \ln U\right)\right) \quad (2.36)$$

mit  
 $U, U_1, U_2$ : auf dem Intervall  $(0,1)$  gleichverteilte Zufallsgrößen,  $U_1$  und  $U_2$  unabhängig.

Pro Simulationstag werden von diesem Generator bei Niederschlag vier, sonst drei Zufallszahlen abgerufen. In Abb. 2.6 ist das Ablaufschema der Witterungsmodellierung dargestellt. Die rechentechnische Realisierung des Wettergenerators sowie der Erzeugung synthetischer Wetterdaten erfolgt wahlweise durch TURBO-PASCAL- oder FOXPRO-Programme.

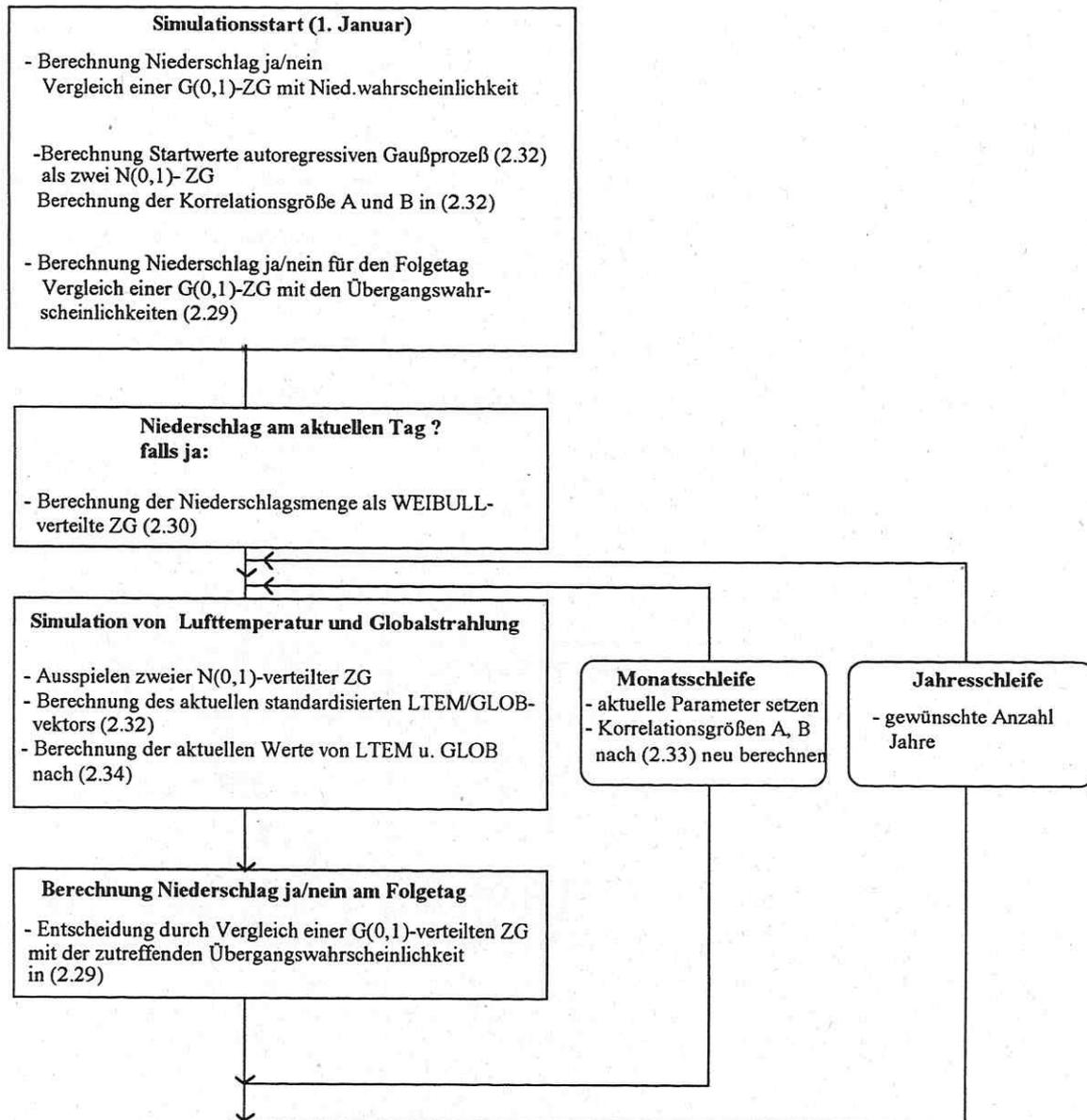


Abb. 2.6: Ablaufschema der Wettergenerierung, (Tagesschleife innerhalb eines Monats nicht dargestellt). Verwendete Abkürzungen: ZG- Zufallsgröße(n),  $G(0,1)$ - auf dem Intervall  $(0,1)$  gleichverteilte ZG,  $N(0,1)$ - standardisierte Normalverteilung

### 2.3.3. Ergebnisse und Schlußfolgerungen

Zur Auswertung der Leistung des beschriebenen Wettergenerators wurden 33 Jahre synthetische Witterung erzeugt und mit den vorliegenden Beobachtungsdaten über 33 Jahre von Bad Lauchstädt verglichen. In Tab. 2.3 sind einige Jahreswitterungskenngrößen gegenübergestellt. Obwohl die 33 Jahre künstliche Witterung willkürlich ausgewählt wurden, offenbaren die Auswertungsergebnisse typische Erscheinungen, die ebenso für andere Ausspielungen charakteristisch sind.

Die Ergebnisse in Tab. 2.3 zeigen, daß die mittleren Verhältnisse bei allen drei Klimagrößen gut wiedergespiegelt werden. Diese Aussage gilt ebenfalls für kleinere Zeitabschnitte, beispielsweise Monatsmittel (hier nicht ausgeführt). Dagegen wird die Variabilität des Klimas, ausgedrückt durch die ausgewiesenen Standardabweichungen, systematisch unterschätzt. Besonders deutlich ist das bei der Größe NIED, für die sich zeigen läßt, daß durch den Ansatz der MARKOV-Kette 1. Ordnung in (2.31) bei den gegebenen Parameterkonstellationen im Mittel nur eine Standardabweichung von 70,0 mm zugelassen wird. Eine Erhöhung der Ordnung der MARKOV-Kette läßt eine bessere Abbildung der Standardabweichung erwarten. Sie führt aber gleichzeitig zu einer unter Umständen starken Zunahme der Parameteranzahl.

Tab. 2.3: Vergleich 33 Jahre reale und synthetische Witterung für Bad Lauchstädt-Jahreswitterungscharakteristika

Witterungsgröße	reale Witterung	synthetische Witterung
LTEM-Jahresmittel:		
- arithmetisches Mittel	9,0 °C	9,0 °C
- Standardabweichung	0,7 °C	0,6 °C
NIED-Jahressumme:		
- arithmetisches Mittel	469,2 mm	467,2 mm
- Standardabweichung	102,8 mm	76,2 mm
GLOB-Jahresmittel:		
- arithmetisches Mittel	897 J cm <sup>-2</sup>	894 J cm <sup>-2</sup>
- Standardabweichung	53 J cm <sup>-2</sup>	40 J cm <sup>-2</sup>

Die Möglichkeiten für eine ersatzweise Verwendung synthetischen Klimamaterials für die Berechnung von bodenspezifischen Größen soll am Beispiel der "wirksamen Mineralisierungszeit" (WMZ) (FRANKO, 1989) für den Standort Bad Lauchstädt auf der Grundlage von 33 Jahren realer sowie synthetischer Witterung aufgezeigt werden, siehe Tab. 2.4.

Tab. 2.4: Vergleich der WMZ-Werte, berechnet mit realen und mit synthetischen Witterungsdaten

	reale Witterung	synthetische Witterung
WMZ-Jahressumme:		
- arithmetisches Mittel	28,7 d	28,5 d
- Standardabweichung	4,2 d	2,9 d
- Maximum	39,3 d	33,4 d
- Minimum	20,9 d	21,4 d

Der mittlere, standorttypische Wert der WMZ-Jahressumme wird sehr gut abgebildet, so wie das schon bei den Jahreskenngrößen der Witterung der Fall war. Die Variabilität (Standardabweichung) dagegen wird unterschätzt.

Eine genauere Abbildung als durch monatsweise konstante Werte des jahreszeitlichen Ganges der Witterungsgrößen LTEM und GLOB z.B. durch eine Summe von Ansatzfunktionen mit unbestimmten Koeffizienten läßt eine qualitative Verbesserung des Wettergenerators erwarten. Allerdings würde das üblicherweise vorhandene Witterungsdatenmaterial im allgemeinen nicht ausreichen, um die gemeinsame Verteilung dieser Koeffizienten hinreichend gut zu quantifizieren. Durch gegebenenfalls neue Modellansätze, besonders bei der Größe NIED, könnte man die Variabilität im simulierten Wettermaterial erhöhen. Das hätte aber auch nur eine Berechtigung, falls gleichzeitig der Jahresgang (mit oben erwähnten Problemen) präziser abgebildet würde.

#### **2.3.4. Die Abbildung möglicher Klimaveränderungen**

In diesem Abschnitt soll eine Methode für die Ableitung von Witterungsszenarien für konkrete Standorte vorgestellt werden, in denen sich die nach Ergebnissen globaler Klimamodelle vermuteten Klimaveränderungen widerspiegeln. Durch Anwendung des Simulationssystems CANDY unter Zuhilfenahme dieser Witterungsszenarios können so die Auswirkungen auf die C- und N-Dynamik untersucht und abgeschätzt werden.

Das angewendete Prinzip der Szenariogewinnung basiert auf Informationen aus Klimamodellrechnungen (übliche Bezeichnung: General Circulation Model, abgekürzt GCM) und soll im folgenden am Beispiel von Bad Lauchstädt, einem Standort in Mitteleuropa, dargestellt werden. Die vorgestellte Methode ist ohne Modifikation auf andere Standorte anwendbar, sofern dort mehrjährige Wetteraufzeichnungen vorhanden sind.

Als Grundlage der Arbeiten diene ein Witterungsszenario für die Jahre 1985-2034, berechnet mit dem Klimamodell ECHAM1/LSG, das vom Deutschen Klimarechenzentrum Hamburg erhalten wurde. Das hierbei unterstellte Entwicklungskonzept der Menschheit für die Zukunft war unverändertes Handeln "business as usual" mit der daraus resultierenden Zunahme klimabeeinflussender Spurengase in der Atmosphäre. Dieses und weitere gebräuchliche Entwicklungsszenarien sind beispielsweise bei GRASSL (1991) aufgeführt. Das hier verwendete Szenario stellt dabei einen vom ökologischen Standpunkt besonders negativen Fall dar.

Die Ergebnisse der GCM-Rechnungen lagen auf einem räumlichen Gitter mit der horizontalen Auflösung  $5,625^\circ \times 5,625^\circ$  (Maschenweite in sphärischen Koordinaten) vor, s. Abb. 2.7.

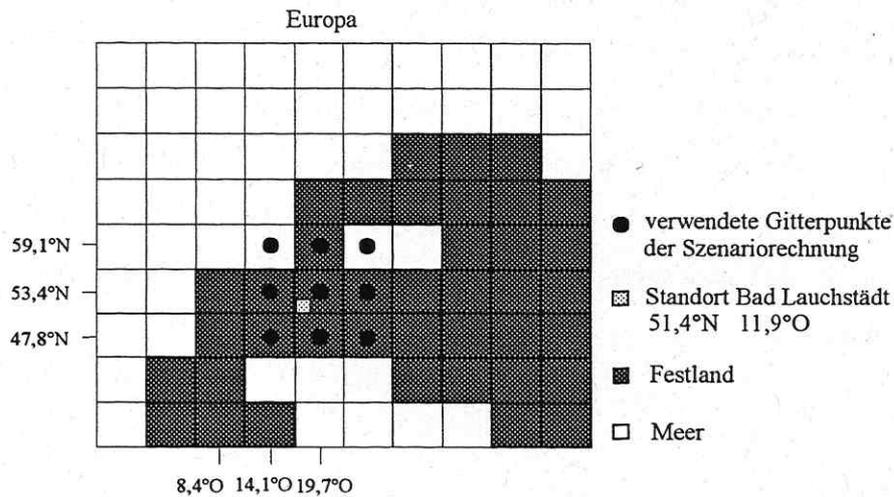


Abb. 2.7: Anordnung der verwendeten Gitterpunkte der Klimaszenariorechnung

Für eine Beschreibung der Grundlagen des Hamburger Klimamodells sowie des gewählten Szenarios wird auf HASSELMANN (1990) und ROECKNER et al. (1992) verwiesen.

Von einem Szenariolauf wurden die Ergebnisse an neun Gitterpunkten, welche den europäischen Raum überdeckten, übernommen. Dabei erfolgte eine Beschränkung auf die Größen Lufttemperatur, Niederschlagsmenge und Globalstrahlung, da nur diese Witterungselemente von CANDY benötigt werden. Da die zeitliche Auflösung der Szenariowerte doppelt so groß war wie von CANDY benötigt, wurden Tagesmittelwerte bzw. -summen gebildet.

Die Verwendung der übernommenen Klimaszenarioergebnisse für Simulationsrechnungen an beliebigen Standorten stieß auf folgende Schwierigkeiten:

- Ein vorliegendes Klimaszenario ist nur eine Realisierung aus der Menge möglicher Verläufe (z.B. durch die Unmöglichkeit genauer Startwertvorgabe). Es muß unterstellt werden, daß in dieser einen Realisierung alle wesentlichen Eigenschaften der Klimaveränderung widergespiegelt werden.
- Die Maschenweite des Modellgitters mit dem ungefähren Abstand von etwa 500 km zwischen zwei Gitterpunkten ist für Ähnlichkeits- und Analogieschlüsse bezüglich der Tageswitterungswerte zu grob. Beispielsweise können damit keine orographischen Effekte aufgelöst werden. Theoretisch ist es zwar möglich, die horizontale Gitterweite

beliebig zu verkleinern. Praktisch sind diesem Vorgehen durch den starken Anstieg der Rechenzeiten deutliche Grenzen gesetzt.

- Die meteorologischen Elemente an den vorliegenden Gitterpunkten stellen eine Art Gebietsmittel über die zugehörige Gittermasche dar, womit eine einfache räumliche Interpolation für die Ableitung der Witterung an anderen Standorten an sich nicht zu empfehlen ist (STORCH et al., 1992). Versucht man dessen ungeachtet, Regressionsbeziehungen zwischen Gitter- und Standortwerten auf Grundlage von tatsächlich eingetretener Witterung zu parametrisieren, so standen im konkreten Fall Werte von etwa acht Jahren zur Verfügung. Es bestehen aber Zweifel an der Extrapolierbarkeit einer auf diese Art erhaltenen Beziehung für größere Zeitabschnitte. Demgegenüber herrscht in Fachkreisen Übereinstimmung, daß die Informationen über den globalen Trend (die Veränderungen in den mittleren Werten der Klimagrößen) aus den Klimamodellrechnungen relativ verlässliche Angaben darstellen, (STORCH et al., 1992).

- **Die Abbildung des Klimawandels in einem Wettergenerator**

Einen guten Überblick über verschiedene Methoden für die Regionalisierung der Aussagen über den vermuteten Klimawechsel geben beispielsweise GIORGI u. MEARNNS, 1991 und JACOB, 1992.

Eine mögliche Herangehensweise an das Regionalisierungsproblem ist die Verwendung eines statistischen Wettergenerators. Er ist dem Inhalt nach ein Modell der Klimaelemente auf statistisch-deskriptive Weise und erlaubt, die relativ sicheren Kenntnisse vom Ist-Zustand der Witterung aus Beobachtungswerten mit den Informationen über den Klimawandel aus den GCM-Rechnungen zu verbinden.

Der gegenwärtige Zustand des Klimas ist im Wettergeneratorparametersatz abgebildet. Diese Parameter werden entsprechend des Zeitpunktes in der Zukunft durch die GCM-Informationen abgeändert.

Die Zuhilfenahme eines Wettergenerators wird auch von anderen Autoren in der Literatur beschrieben, z.B. von

- SEMENOV u. PORTER, 1995, welche einen Überblick über die Literatur zur Modellierung von Klimavariabilität und deren Einfluß auf Pflanzenerträge geben, allerdings die verwendeten Algorithmen ihres Herangehens im einzelnen nicht beschreiben
- WILKS, 1992, welcher eine ausführliche Diskussion der möglichen Änderungen des Parametersatzes als Abbildung des Klimawandels durchführt. WILKS benutzt die aus GCM-Läufen erhaltenen globale Inkremente der Witterungsgrößen und korrigiert diese entsprechend der Jahreszeit und der geographischen Lage. Das Verfahren der Korrektur entsprechend der Lage des Zielstandortes gegenüber den Gitterpunkten der GCM-Rechnung wird nicht beschrieben.

Der in dieser Arbeit verfolgte Weg basiert auf einem Aufdatierungsverfahren des Ausgangsparametersatzes durch jährliche Inkremente, die durch ein Interpolationsverfahren aus den Inkrementen an den nächsten Gitterpunkten der GCM-Rechnung erhalten wurden.

Folgende Schritte waren dazu erforderlich:

Die Klimaszenariodaten wurden zuerst auf Monatsmittel verdichtet, um mit dem oben beschriebenen Wettergeneratordatensatz konsistent zu sein. An den Monatsmittelwerten (empirische erste Momente) erfolgte eine Untersuchung auf einen Zeittrend, welcher ein Indikator für eine Klimaveränderung darstellt.

Für den gewählten Zeitraum von 1985-2034 erschien die Postulation linearer Trends in den betrachteten Witterungselementen ausreichend, s. Abb. 2.8 für ein Beispiel. Sie wurden durch die Methode der kleinsten Abweichungsquadrate geschätzt. Methoden, die gegenüber Ausreißern ein robusteres Verhalten aufweisen (s. z.B. HARTUNG 1991, S. 852-853), wären unter Umständen geeigneter gewesen; wurden hier aber nicht angewendet.

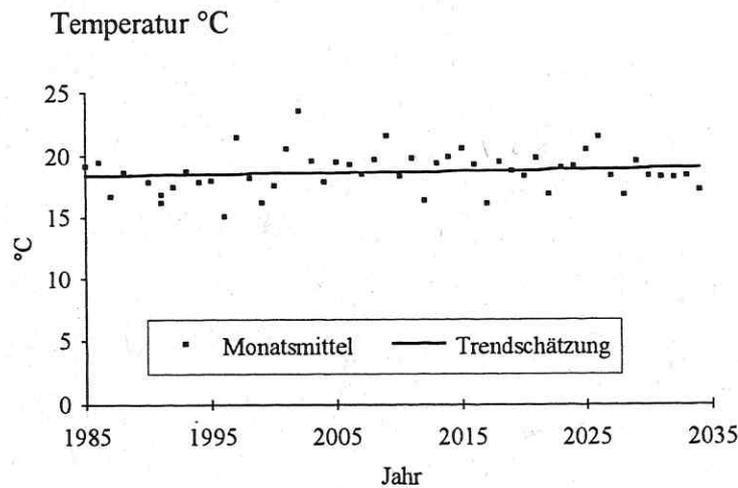


Abb. 2.8: Monatsmittel der Lufttemperatur für den Monat Juni am Gitterpunkt 53,4 °N 14,1°O

Für alle Szenarioergebnisse an den Gitterpunkten war charakteristisch, daß sie eine hohe Variabilität in der Zeit aufwiesen und ein Anstieg mit von Null verschiedenen Werten nicht für alle Monatsmittel zur Irrtumswahrscheinlichkeit von 5% gesichert werden konnte.

Eine Teilung der Monatsmittelreihen in zwei Teilstücke mit je 25 Jahren und Bestimmung der empirischen zweiten Momente ließ keine Notwendigkeit erkennen, im Rahmen der Genauigkeit der Varianzdarstellung durch den Wettergenerator einen Trend in diesen Größen zu berücksichtigen. Eine Trenduntersuchung für die Übergangswahrscheinlichkeiten der MARKOV-Kette des Niederschlagsprozesses erfolgte nicht, da die Zeitreihen für 1985-92 an den vier nächstgelegenen Gitterpunkten um Bad Lauchstädt im Muster kaum Ähnlichkeiten zu diesem Standort aufwiesen. Ebenso unterblieb eine Trenduntersuchung in den Korrelationsgrößen zwischen Lufttemperatur und Globalstrahlung, da die Kreuzkorrelationsfunktionen in drei der vier Gitterpunkte für 1985-92 ein qualitativ völlig anderes Aussehen als die des Standortes aufwiesen.

Somit wurden die Klimaszenarioergebnisse nur zur Aktualisierung der ersten Momente der Witterungsgrößen herangezogen, während die anderen Parameter des Wettergenerators unangetastet blieben.

Es soll bemerkt werden, daß die geschilderte Methode auch für beliebige andere Trendansätze (z.B. quadratisch oder kubisch) ohne Modifikation anwendbar ist.

Zuletzt mußte noch festgelegt werden, in welchem Maße die Trendveränderungen an den einzelnen Gitterpunkten einen Beitrag zur Trendveränderung des Zielstandortes Bad

Lauchstädt beitragen. Die Entscheidung fiel auf ein räumliches Interpolationsverfahren für stetige Zustandsgrößen über Kugelflächen von WILLMOTT/ ROWE/PHILPOT (1985) s. Gl. (2.37) - (2.40). Das Verfahren wichtet die betrachteten Größen an den Gitterpunkten entfernungs- und richtungsabhängig und summiert sie zu einem Wert für den untersuchten Standort. Die benutzten Wichtungsfunktionen befinden sich mit bestimmten geostatistischen Prinzipien (s. RIPLEY 1988, S. 3 und HENLEY 1981, S. 87) im Einklang.

$$Z_d = \sum_{k=1}^K (W_k Z_k) / \sum_{k=1}^K W_k \quad (2.37)$$

$$W_k = S_k^2 (1 + T_k / \sum_{l=1}^K S_l) \quad (2.38)$$

$$S_k = \begin{cases} 1/d_k & \text{für } d_k \leq R/3 \\ 27(d_k/R - 1)^2 / (4R) & \text{für } R/3 < d_k \leq R \\ 0 & \text{für } d_k > R \end{cases} \quad (2.39)$$

$$T_k = \sum_{l=1}^K S_k (1 - \cos \theta_{kl}) \quad (2.40)$$

mit

$Z_d$  : Interpolationswert am betrachteten Standort

$Z_k$  : Klimamodellwert am Gitterpunkt  $k$ ,  $k=1(1)K$

$K$  : Anzahl Gitterpunkte für die Interpolation

$R$  : Einflußradius (vorgegebener Parameter)

$W_k$  : Wichtungsfaktor für Gitterpunkt  $k$

$S_k$  : entfernungsabhängiger Anteil des Wichtungsfaktors  $W_k$

$T_k$  : richtungsabhängiger Anteil des Wichtungsfaktors  $W_k$

$d_k$  : Abstand zwischen Gitterpunkt  $k$  und dem untersuchten Standort

$\theta_{kl}$  : sphärischer Winkel zwischen den Gitterpunkten  $k$  und  $l$  mit der Spitze im Untersuchungsstandort.

Im einzelnen heißt das:

- es wurden die vier unmittelbar benachbarten Gitterpunkte zur Interpolation benutzt (d.h.

$K = 4$ )

- bei den Größen Lufttemperatur und Globalstrahlung wurden die jährlichen Inkremente in den ersten Momenten interpoliert und das Ergebnis jährlich zu den entsprechenden Monatsmitteln in den Wettergeneratorparametern addiert

- beim Niederschlag wurde unter Annahme eines für das Szenario konstanten

Umrechnungsfaktors in den Monatsniederschlagsmengen von jeweils einem Gitterpunkt zu

Bad Lauchstädt die Interpolation durchgeführt.

Die Simulation der vermuteter Klimaveränderungen und ihrer Wirkung auf die C-N-Dynamik erfolgt nun nach dem Schema in Abb. 2.9:

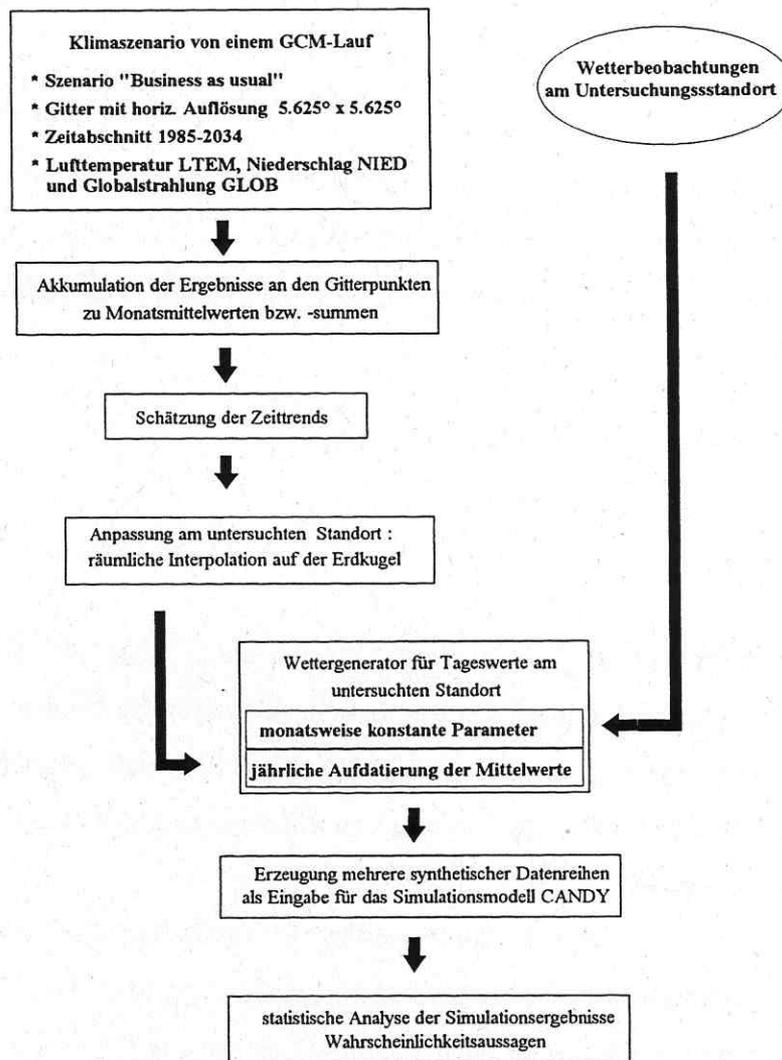


Abb. 2.9: Ablaufschema der Klimaprognose am Untersuchungsstandort

- Aufdatierung der ersten Momente der meteorologischen Größen in den Wettergeneratordaten entsprechend der geschilderten Vorgehensweise für den gewünschten Zeitpunkt in der Zukunft (bis max. zum Jahre 2034)
- Erzeugung beliebig vieler Jahreswitterungsverläufe unter Verwendung der veränderten Wettergeneratorparameter vom gewünschten Zeitpunkt; jeder dieser Verläufe stellt einen statistisch gleichberechtigten Wetterablauf dar
- Eingabe der erzeugten Witterung in das Simulationsmodell CANDY
- statistische Auswertung durch Angabe von relativen Häufigkeiten bzw. Wahrscheinlichkeiten für das Auftreten interessierender Effekte

Die Algorithmen der Interpolation und der Generatorparametereinführung wurden in TURBO-PASCAL programmiert.

Die auf diesem Weg gefundenen Wetterdaten sind keine Prognosen der lokalen Klimaentwicklung im engeren Sinne, sondern geben eine plausible Möglichkeit auf der Basis der globalen Entwicklung wieder: Damit wird es möglich, in erster Näherung die Auswirkung möglicher Klimaveränderungen auf wichtige Bodeneigenschaften abzuschätzen.

### **3. Modellvalidierung**

#### **3.1. Meßfeld Bad Lauchstädt**

##### **3.1.1. Anlage**

Eine entscheidende experimentelle Basis für die Weiterentwicklung und Validierung des Simulationssystems CANDY stellt das in Bad Lauchstädt angelegte Meßfeld dar.

Hier werden seit 1989 wichtige Meßreihen agrarökologischer Zustandsgrößen erfaßt, die zur Untersuchung des Einflusses der Entwicklung von Pflanzenbeständen auf die Temperatur-, Wasser- und C-N-Dynamik im Boden benötigt werden.

Auf vier Längsparzellen von jeweils 190m<sup>2</sup> werden die Fruchtarten Zuckerrüben, Sommergerste, Kartoffeln sowie Winterweizen in Rotation angebaut. Die Bewirtschaftungsmaßnahmen des Modellversuches (Bearbeitung, Sorten, Pflanzenschutz) erfolgen analog zum nahe gelegenen Statischen Dauerdüngungsversuch.

Zur Differenzierung der Höhe der N-Düngung, die sich auf dem Meßfeld aus den Prognosen der jeweils aktuellen Modellrechnungen von CANDY ergibt, erfolgte eine Längsteilung für jede Fruchtart. Die nördlichen Parzellenhälften werden entsprechend der Modellempfehlung („Nullbilanz“) gedüngt. Die südlichen Parzellenhälften erhalten zusätzlich zur CANDY-Empfehlung einen fruchtartenspezifischen Aufschlag. Dieser beträgt seit 1992 für Sommergerste 40, für Winterweizen 50 sowie für Kartoffeln und Zuckerrüben jeweils 60 kg N/ha. In der Abbildung 3.1 ist der Aufbau des Meßfeldes schematisch dargestellt.

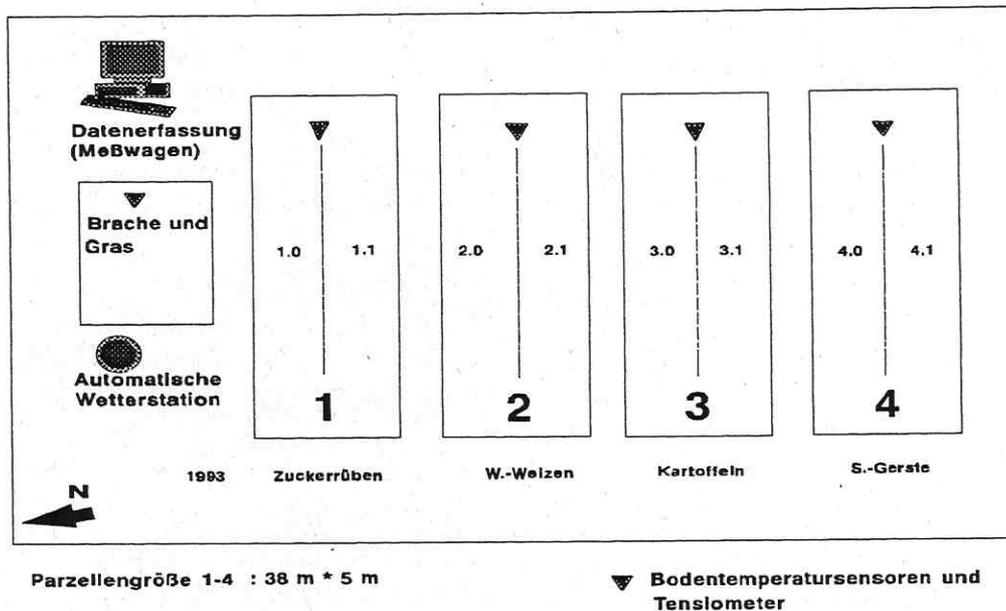


Abb. 3.1: Anlagenschema des Messfeldes in Bad Lauchstädt

### 3.1.2. Standortcharakterisierung

Der Standort Bad Lauchstädt liegt im östlichen Teil der lößbestimmten Querfurter Platte und ist aufgrund der Regenschattenwirkung des Harzes dem Mitteldeutschen Trockengebiet zuzuordnen.

Die klimatischen Besonderheiten der Region führten dazu, daß die vorhandene Schwarzerde bisher nur wenig abgebaut wurde und somit kaum an Fruchtbarkeit verloren hat. In Tabelle 3.1 sind einige allgemeingültige Standortangaben zusammengestellt.

Tab. 3.1: Standortangaben Bad Lauchstädt

<b>Geographische Lage</b>	51°24' nördl. Breite / 11°53' östl. Länge
<b>Höhenlage</b>	113 m über NN
<b>Klassifikation des Bodens:</b> FAO Subtyp der Kartieranleitung 3 Bodenform der TGL 24300 Bodenschätzung	Haplic Tschernosem Typischer Tschernosem (TTn) Löß-Schwarzerde (öt) L1Lö Bodenwertzahl 94-98
<b>Grundwasserstand</b>	ca. 12 m (Frühjahr 1994)
<b>Mittlerer Jahresniederschlag (1902-92)</b>	480 mm
<b>Mittlere Jahrestemperatur (1902-92)</b>	8,8 °C

In Tabelle 3.2 sind die Ergebnisse einer auf dem Versuchsfeld Bad Lauchstädt von ALTERMANN durchgeführten bodenkundlichen Profilaufnahme zusammengestellt.

Tab. 3.2: Bodenkundliche Profilaufnahme Bad Lauchstädt (nach KA 4)

Nr	Horizont Tiefe (cm) Symbol	Farbe	Hu	Kalk	pedogene Merkmale Substratmerkmale
1	30 rAxp	7,5YR2/2	h 3	c 1	Plattengefüge; stark durchwurzelt; Ut4,mG1 (stark toniger Schluff, sehr schwach mittelkiesig); Kiesanteile durch Wegebau
2	50 Axh	7,5YR2/1-2	h 3	c 2	Krümelfüge; stark durchwurzelt; Krotowinen; Wurzelröhren; Ut4 (stark toniger Schluff); Gipsausblühungen
3	60 elC-Axh	7,5YR4/2	h 2	c 4	Subpolyedergefüge; mittel durchwurzelt; Krotowinen, Wurzelröhren; Ut3 (mittel toniger Schluff)
4	125 elC	10YR5/6	h 1	c 4	Subpolyedergefüge; schwach durchwurzelt, Wurzelröhren; UT3 (mittel toniger Schluff)
5	170 II elCkc	10YR4/6 + 10YR5/8	h 0	c 3.4	Subpolyedergefüge; sehr schwach durchwurzelt; Rostadern; Ls4,gG2 (stark sandiger Lehm, schwach grobkiesig) mit s13, gG4-Bänder, -keilen (mittel lehmiger Sand, stark grobkiesig); Kryoturbationen; Kalkadern, Lößkindl

Für ein am Meßfeld ausgehobenes Bodenprofil wurden im Herbst 1992 an ungestörten Proben (Stechzylinder) wichtige bodenphysikalische Eigenschaften bis zu einer Tiefe von 90 cm analysiert (Abb. 3.2).

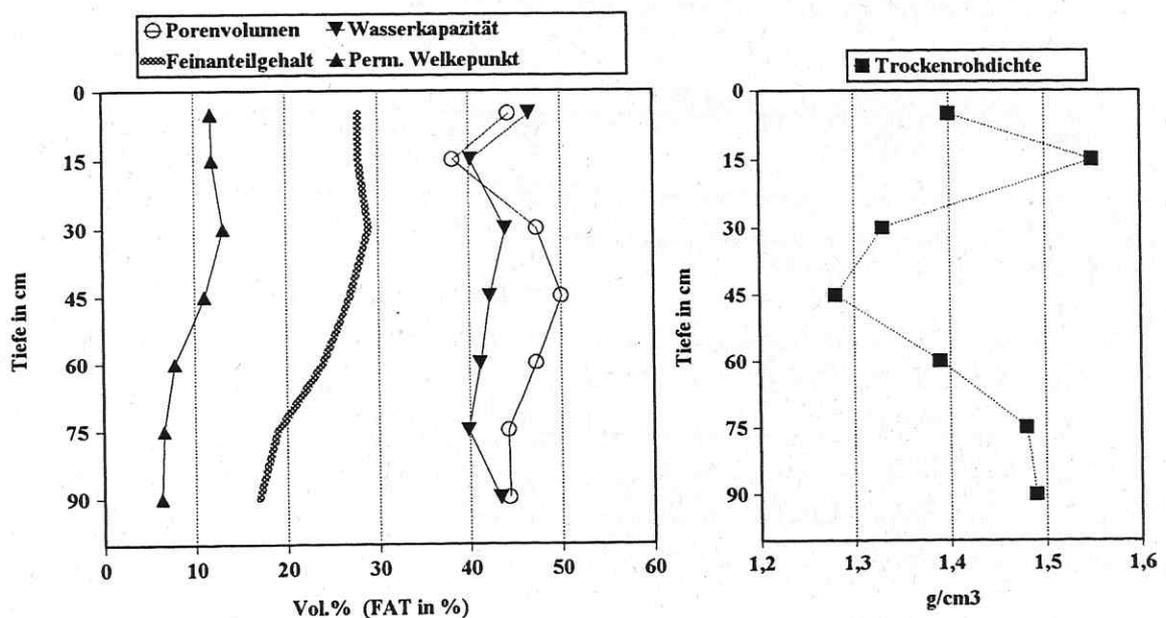


Abb. 3.2: Bodenphysikalische Eigenschaften bis 90 cm Bodentiefe am Meßfeld Bad Lauchstädt

Die Abbildung 3.2 veranschaulicht die engen Zusammenhänge zwischen der Textur (siehe Feinanteilgehalt) und den bodenphysikalischen Eigenschaften. Der Anstieg der Trockenrohdichte in 15 cm Tiefe ist auf technologisch bedingte Verdichtungen zurückzuführen.

### 3.1.3. Meß- und Untersuchungsprogramm

Durch die Installation einer automatischen Wetterstation sowie von 5 Datenloggern (Fa. Lambrecht GmbH Göttingen) können seit 1992 zahlreiche Daten in hoher zeitlicher Auflösung (10 Minuten) erfaßt werden. In Tabelle 3.2 sind die automatisch erfaßten Daten zusammengestellt.

Tab. 3.2: Automatisch erfaßte Meßwerte auf dem Meßfeld in Bad Lauchstädt

Meßgröße	Einheit	Varianten	Meßhöhen bzw.-tiefen (in cm)
Lufttemperatur	°C	-	20, 200
Niederschlag	mm	-	100
Rel. Luftfeuchte	%	-	200
Globalstrahlung	W/m <sup>2</sup>	-	200
Windrichtung	Grad	-	250
Windgeschwindigkeit	m/s	-	250
Temperatur an der Bodenoberfläche	°C	4 Fruchtarten (Winterweizen, Sommergerste, Zuckerrüben, Kartoffeln)	5
Bodentemperatur	°C	4 Fruchtarten und Brache	5, 20, 50
Saugspannung *	hPa	4 Fruchtarten und Brache	30, 60, 90

\* Messungen nur in frostfreier Zeit

#### • Meßprinzipien der automatisch erfaßten Zustandsgrößen:

- Die Luft- und Bodentemperaturen werden mit PT100 - Widerstandsthermometern gemessen. Die Sensoren zur Messung der Lufttemperatur sind am Mast der Wetterstation strahlungsgeschützt angebracht und werden zusätzlich durch einen Ventilator belüftet.

- Ein automatischer Regenschirm erfaßt den auf eine Fläche von 200 cm<sup>2</sup> fallenden Niederschlag. Mit Hilfe einer Wippe wird der kontinuierlich fallende Niederschlag in Impulse umgewandelt. Ein Impuls entspricht dabei der Niederschlagshöhe von 0,1 mm Wasser. Zur

Erfassung von festen Niederschlägen ist die Meßeinrichtung mit einem Heizsystem (2°C) ausgerüstet.

- Die Globalstrahlung wird mit einem Sternpyranometer gemessen. Das Meßprinzip beruht auf der Auswertung der Temperaturdifferenz von Thermoelementen mit schwarzer und weißer Lackierung, die sich unter einer Glaskuppel befinden.

- Die Luftfeuchtemessung erfolgt mit Hilfe eines Haarhygrometers. Das Meßinstrument ist in einer Hütte montiert und damit vor Strahlung und Niederschlag geschützt.

- Vom Wind werden Richtung und Geschwindigkeit erfaßt. Zur Richtungsmessung dient ein Ringschleifenwiderstand, während die Windgeschwindigkeit nach dem Dynamoprinzip gemessen wird.

- Die Saugspannung im Boden wird mit Druckaufnehmer- Tensiometern (Fa. UGT Müncheberg) gemessen. Das Funktionsprinzip besteht in der Messung der Saugspannung infolge Druckausgleiches zwischen Tensiometerflüssigkeit und Boden über eine Keramikzelle. Über die Tensiometerflüssigkeit wird die im Boden herrschende Wasserspannung auf den Druckwandler übertragen, der diese in ein kontinuierliches elektrisches Meßsignal wandelt.

An Boden- und Pflanzenproben werden folgende Laboruntersuchungen vorgenommen:

**-Bodenuntersuchungen:**

- Bodenfeuchte in den Tiefen 0-30, 30-60 und 60-90 cm (gravimetrische Untersuchung)
- $N_{an}$ -Gehalt in den Tiefen 0-30, 30-60 und 60-90 cm
- $C_t$ -Gehalt in der Ackerkrume (0-30 cm) im Frühjahr und Herbst

**-Pflanzenuntersuchungen:**

- Ertrag ,Trockensubstanzgehalt sowie N-Entzug durch die Biomasse zur Ernte
- Qualitätsmerkmale (Zucker- bzw. Stärkegehalt)
- $C_t$ -Gehalt von Stroh und Rübenblatt (wird eingearbeitet)

### 3.1.4. Ausgewählte Meß- und Untersuchungsergebnisse

- **Witterung:**

Nach den vorangegangenen sehr trockenen 4 Jahren sind die Jahre 1992 und 1993 hinsichtlich der Jahresniederschlagssummen wieder im langjährigen Normalbereich für den Standort Bad Lauchstädt anzusiedeln (siehe Tabelle 3.3) .

Tab. 3.3: Jahresmittel bzw. -summen von Lufttemperatur, Niederschlag und potentieller Evapotranspiration für Bad Lauchstädt 1988-94

<b>Jahr</b>	<b>Mittlere Temperatur [°C]</b>	<b>Jahresniederschlag [mm]</b>	<b>Potentielle Evapotranspiration [mm] *</b>
1988	10,0	393	688
1989	10,5	370	729
1990	10,3	378	657
1991	8,9	272	643
1992	9,9	478	744
1993	8,7	497	725
1994	10,1	654	721
<b>Langj.Mittel bzw. Summe</b>	<b>8,7</b>	<b>476</b>	<b>642</b>

(\* berechnet mit CANDY)

Die mittlere Jahrestemperatur lag in den Jahren 1988 bis 1994 z.T. erheblich über dem langjährigen Mittelwert. Das Jahr 1994 war durch überdurchschnittlich hohe Niederschläge gekennzeichnet. Diese wurden allerdings durch die hohe Evapotranspiration kompensiert.

Die Abbildungen 3.3 und 3.4 verdeutlichen die Monatsverteilungen von Temperatur bzw. Niederschlag in den Jahren 1992 bis 1994 im Vergleich zu den langjährigen Mittelwerten.

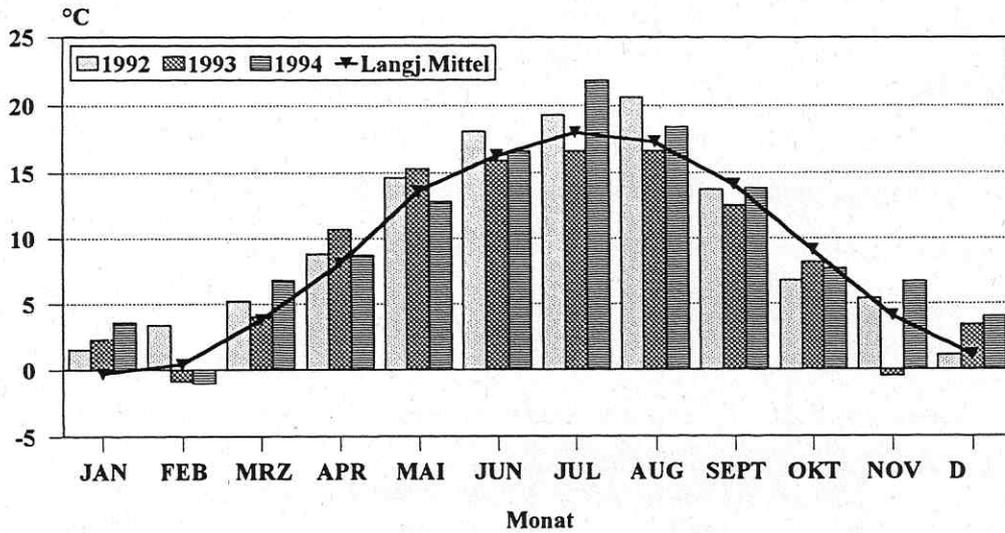


Abb. 3.3: Monatsmittel der Lufttemperatur am Standort Bad Lauchstädt

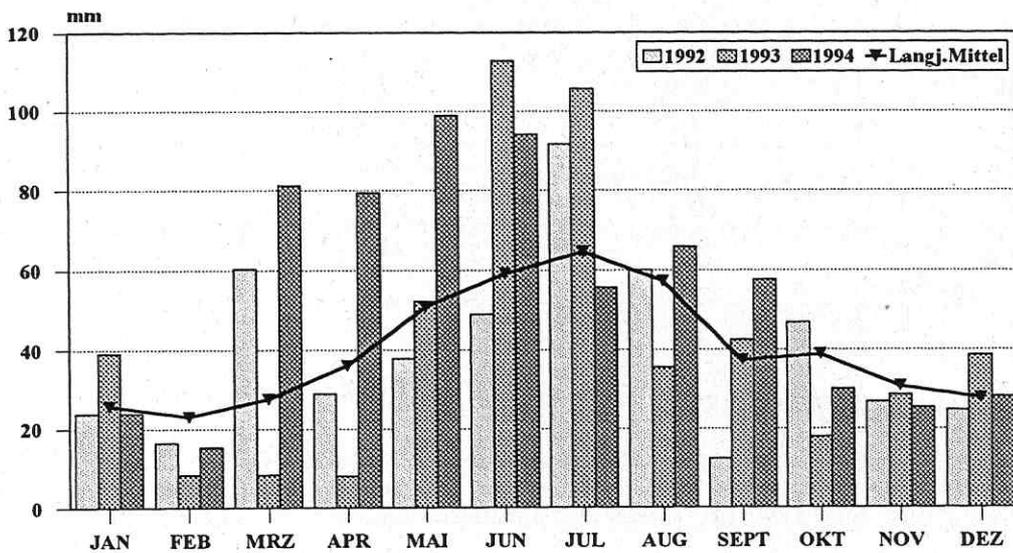


Abb. 3.4: Monatssummen des Niederschlages am Standort Bad Lauchstädt

In der Abbildung 3.5 sind die Witterungsdaten für das Jahr 1994 als Tageswerte noch höher zeitlich aufgelöst dargestellt. Neben den sehr hohen Temperaturen im Hochsommer waren mehrere kurze Starkniederschlagsperioden für das Jahr 1994 charakteristisch. So fielen von den ca. 96 mm Gesamtniederschlag des Monats Juni 76 mm innerhalb von ca. 40 Minuten.

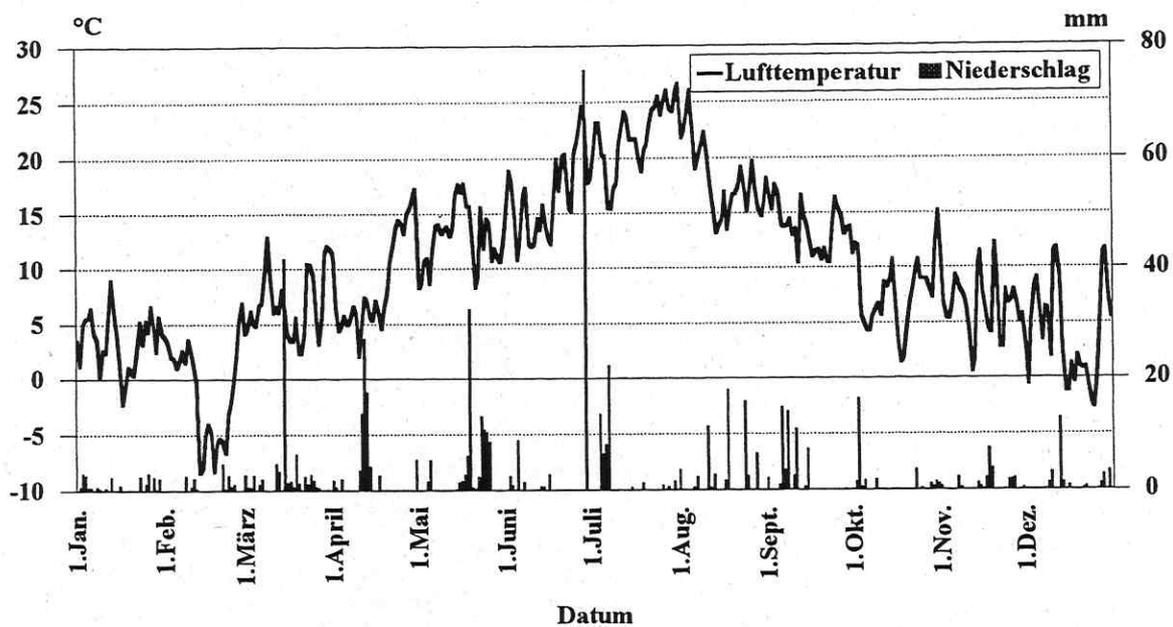


Abb. 3.5: Lufttemperatur und Niederschlag in Bad Lauchstädt 1994 (Tagesmittel bzw. -summen)

• **Bodenwasser:**

In der Abbildung 3.6 sind die Ergebnisse der gravimetrischen Bodenfeuchteuntersuchung aller Meßfeldvarianten für Frühjahrstermine der Jahre 1992-94 aufgeführt.

Dabei wird ersichtlich, daß die für das Frühjahr im allgemeinen unterstellte Auffüllung des Bodenwasservorrates auf Feldkapazität vor allem in den Jahren 1992 und 1993 infolge der Nachwirkungen der vorangegangenen extrem trockenen Jahre nicht erreicht wurde.

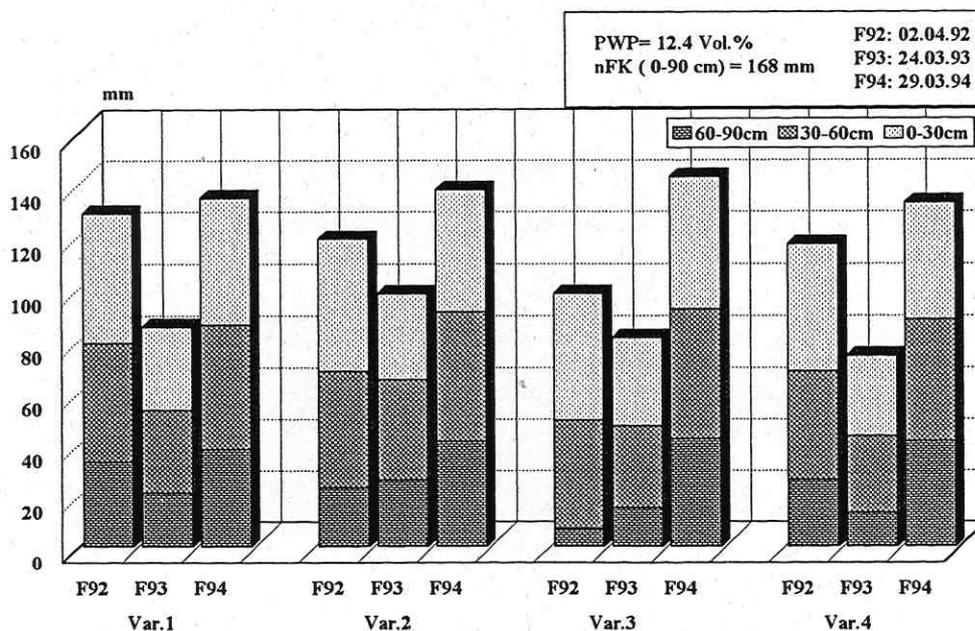
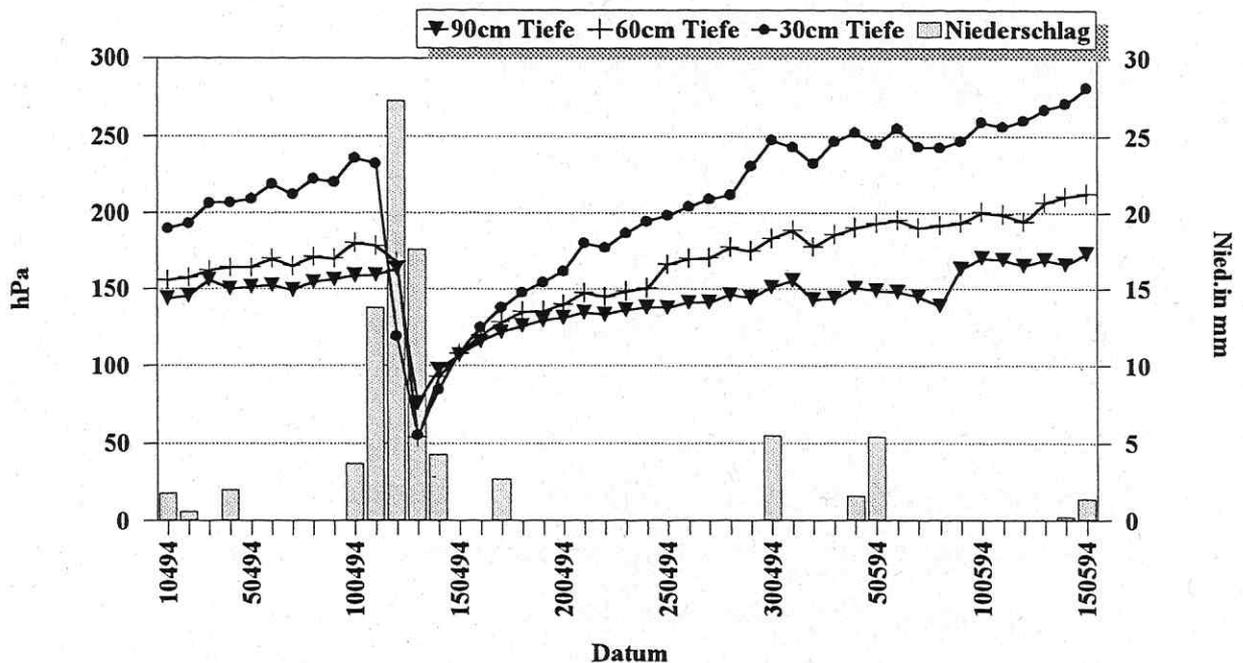


Abb. 3.6: Nutzbares Bodenwasser im Frühjahr (1992-1994)

Die installierten Tensiometer erlauben es, die Bodenwasserverhältnisse auf dem Meßfeld in hoher zeitlicher Auflösung zu erfassen. In der Abbildung 3.7 ist der Saugspannungsverlauf in den 3 Meßtiefen in unbewachsenem Boden dargestellt. Der ausgewählte Meßzeitraum schließt eine Pentade mit hohem Niederschlag ein. Anhand der Grafik läßt sich ein deutlich unterschiedlicher Wiederanstieg der Saugspannung in den 3 Tiefen nach Durchgang der Befeuchtungsfront erkennen.



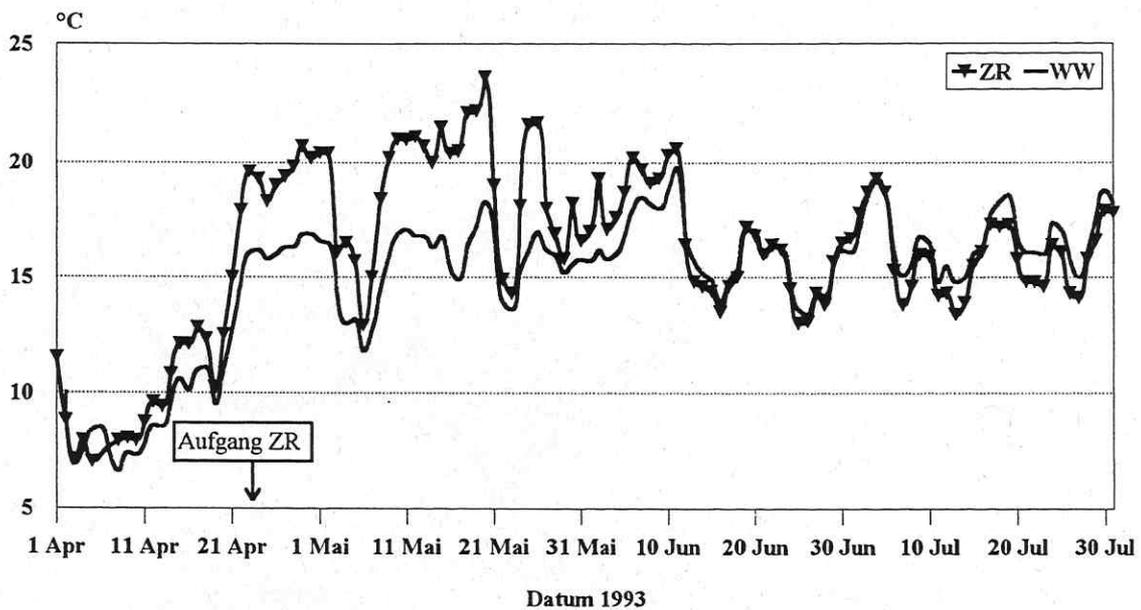


Abb.3.8: Verlauf der Bodentemperatur (Tagesmittelwerte) in 5cm Tiefe unter Zuckerrüben und Winterweizen

Die in Abbildung 3.8 dargestellten Meßreihen der Bodentemperaturmittelwerte in 5 cm Bodentiefe unter Winterweizen und Zuckerrüben zeigen deutlich unterschiedliche Dämpfungswirkungen der Bestände auf die Bodentemperatur. Bis zur 2. Junidekade sind die Tagesmittelwerte auf der Zuckerrübenvariante aufgrund ihrer erst einsetzenden Bestandesausprägung regelmäßig höher als unter Winterweizen. Bis zur 1. Dekade im Juli gibt es kaum Unterschiede in den Tagesmittelwerten der Bodentemperatur, danach zeigt sich die beginnende Abreife des Winterweizens.

Die Abbildung 3.9 zeigt einen Ausschnitt der Bodentemperaturdaten unter Zuckerrüben im August 1992 in hoher zeitlicher Auflösung (10 Minuten). Die Grafik verdeutlicht beispielhaft den Tagesgang der Bodentemperatur sowie eine mit zunehmender Bodentiefe abgeschwächte Tagesdynamik.

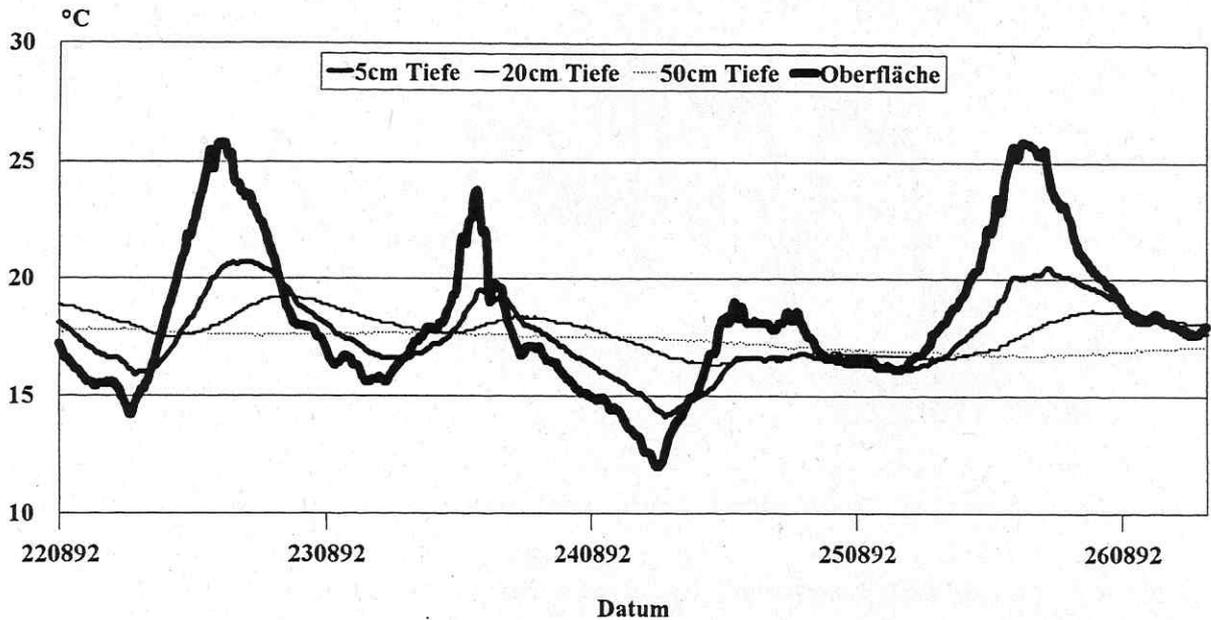


Abb. 3.9: Dämpfung der täglichen Bodentemperaturschwankung unter Zuckerrüben mit zunehmender Bodentiefe

- Stickstoff (N<sub>an</sub> im Boden):

Die in der folgenden Grafik veranschaulichten N<sub>an</sub>- Profile bis 90 cm Tiefe deuten auf eine fruchtartenabhängige Beeinflussung der Stickstoffdynamik hin. Die zugehörigen Informationen zu Düngung und Ertrag für die ausgewählten Varianten sind in Tabelle 3.4 aufgeführt.

Tab. 3.4: Düngung und Entzüge in den Jahren 1992 und 1993 auf ausgewählten Meßfeldvarianten

Variante	Jahr -Fruchtart	Ertrag [dt/ha]	N-Entzug [kg/ha]	N-Düngung [kg/ha]
1.1	1992- Winterweizen	56	163	120
	1993- Zuckerrüben	759	320 (221 Blatt)	160
4.1	1992- Zuckerrüben	600	323 (161 Blatt)	100
	1993- Sommergerste	66	145	140

Bei der Interpretation muß berücksichtigt werden, daß auf dem Meßfeld seit 1992 Getreidestroh sowie Rübenblatt als organische Dünger eingearbeitet werden. Die Wirkung des Rübenblattes als relativ schnell verfügbarer N-Pool spiegelt sich im deutlichen mineralisierungsbedingten Anstieg des N<sub>an</sub>-Gehaltes zwischen Herbsttermin und darauffolgendem Frühjahr wider. Der auffällige Anstieg des N<sub>an</sub>-Gehaltes in der Schicht 60 - 90 cm der Variante 4.1 in der Vegetationsperiode 1993 kann auf Verlagerungsprozesse aufgrund der relativ hohen Sommerniederschläge zurückgeführt werden. Auf der Variante 1.1

erfolgte im gleichen Zeitraum hingegen eine stärkere Ausnutzung des N-Bodenvorrates durch den bis zum Oktober stehenden Zuckerrübenbestand.

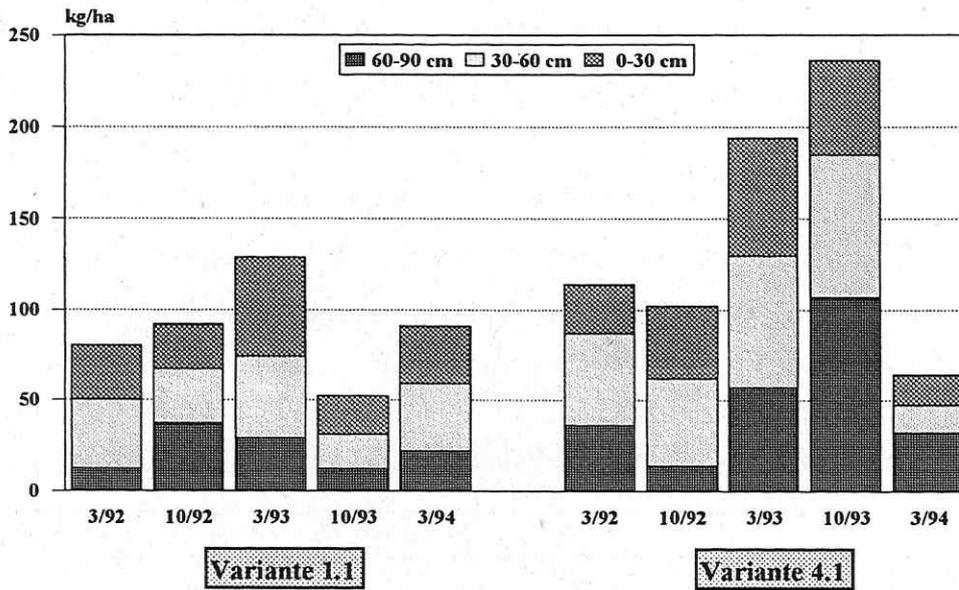


Abb. 3.10: Nan - Profile von Frühjahr 1992 bis Frühjahr 1994 für 2 Meßfeldvarianten

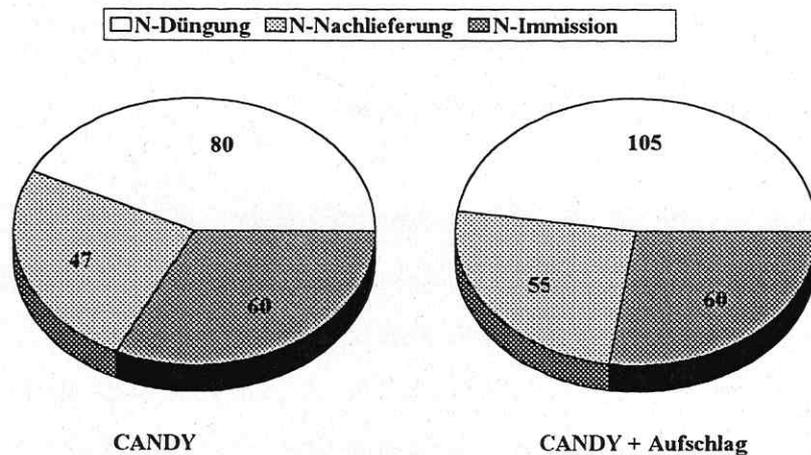


Abb. 3.11: Mittlere jährliche N-Inputs auf den zwei Düngungsvarianten des Meßfeldes (1990-93)

Um die N-Inputs der auf dem Meßfeld vorhandenen zwei N-Düngungsstufen analysieren und vergleichen zu können, wurden eine vollständige Rotation (1990-93) als Zeitbasis gewählt und die auf ein Jahr bezogenen Rotationsmittelwerte berechnet (Abb.3.11).

Die Werte für die N-Nachlieferung aus dem Boden wurden aus den Modellrechnungen übernommen. Es wird deutlich, daß ein beträchtlicher Anteil des Mineralstickstoffs aus der OBS nachgeliefert wird. Diese Tatsache wird in der praktischen Landwirtschaft häufig unterschätzt.

Die Berechnung der Quotienten aus N-Offtake (mit Marktprodukt abgefahrene N-Menge) und Mineraldüngereinsatz zeigt die „Nullbilanz“-Varianten als die effizienteren hinsichtlich der N-Ausnutzung (Tab.3.5). Der Quotient aus N-Nachlieferung aus der OBS und N-Zufuhr in den Boden durch OPS (Tab. 3.5) ermöglicht eine Einschätzung der OBS-Entwicklung. Die nach CANDY- Empfehlung gedüngten Varianten tendieren zu einem leichten OBS-Abbau. Die Aufschlagvarianten deuten dagegen auf eine schwach ausgeprägte erweiterte Reproduktion der OBS hin. Obwohl beide Varianten eine Senke für atmosphärischen Stickstoff darstellen (gasförmige N-Verluste < N-Immission, vgl. Tab 3.5), stellt sich auch hier die zur CANDY- „Nullbilanz“ gedüngte Stufe als die ökologisch günstigere dar.

Tab. 3.5: Vergleich von Kennziffern für die zwei Düngungsstufen des Meßfeldes, bezogen auf eine Rotation

Quotient	CANDY- „Nullbilanz“	CANDY+Aufschlag
1. N-Düngung / N-Offtake	1,42	1,24
2. N-Nachlieferung / N-Input (org.)	1,02	0,97
3. Gasförmige N-Verluste / N-Immission	0.40	0,46

### 3.1.5. Vergleich von Meß- und Modellwerten

Die auf dem Meßfeld erhobenen mehrjährigen Meßreihen zu Bodenwasser, Bodentemperatur sowie anorganischem Bodenstickstoff bilden eine gute Basis für Vergleiche mit den vom Simulationssystem CANDY berechneten Werten.

Die nachfolgend dargestellten Vergleiche von Simulation und Messung für den Zeitraum 1992 bis Frühjahr 1994 beziehen sich auf ausgewählte Bodenschichten (0-60 cm) bzw. -tiefen.

Die Simulationsrechnungen wurden für den Zeitraum 1989 bis Frühjahr 1994 durchgeführt. Eine Anpassung der Modellwerte erfolgte dabei an die Meßwerte für Bodenwasser (0-60cm) sowie umsetzbaren Kohlenstoff (0-30 cm) vom Frühjahr 1989 bzw. für Nan-Meßwerte (0-60 cm) vom Februar 1992. Für die Bodentemperatur erfolgte keine weitere Anpassung des mit dem Simulationsstart (1.1.1989) angenommenen Startprofiles.

Zum besseren Verständnis der nachfolgenden Vergleiche von Meß- und Modellwerten sind in Tabelle 3.6 die Fruchtfolgen auf den Varianten 1-4 des Meßfeldes für die Jahre 1991-94 zusammengestellt.

Tab. 3.6: Fruchtartenbelegung auf dem Meßfeld in Bad Lauchstädt 1991-94

Variante	1991	1992	1993	1994
Meßfeld 1	Kartoffeln	Winterweizen	Zuckerrüben	Sommergerste
Meßfeld 2	Sommergerste	Kartoffeln	Winterweizen	Zuckerrüben
Meßfeld 3	Zuckerrüben	Sommergerste	Kartoffeln	Winterweizen
Meßfeld 4	Winterweizen	Zuckerrüben	Sommergerste	Kartoffeln

Als statistische Maßzahl für den Vergleich von Meß- und Modellergebnissen wird die Wurzel aus der mittleren quadratischen Abweichung (RMS) berechnet

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (T_{\text{mod},i} - T_{\text{mes},i})^2} \quad (3.1)$$

mit  
 N: Anzahl Messungen       $T_{\text{mes},i}$ : gemessener Wert       $T_{\text{mod},i}$ : simulierter Wert.

• **Bodenwasser in 0-60 cm Tiefe**

Die Gegenüberstellung der Bodenfeuchtwerte (Abb. 3.11 bis 3.14) zeigt eine leichte Überschätzung des Bodenwassergehaltes durch das Modell, die besonders in der Hauptwachstumszeit deutlich wird. Insgesamt wird die Bodenfeuchtedynamik für den Standort Bad Lauchstädt von CANDY gut wiedergegeben. Es fällt auf, daß vom Modell die extremen Austrocknungsphasen im Mai 1992 bzw. Mai 1993 nicht in vollem Umfang abgebildet werden. Die Statistik (Tab. 3.7) zeigt eine mittlere Abweichung von ca. 4 Volumenprozent. Dieser Wert ist akzeptabel, wenn man bedenkt, daß der Fehler der gravimetrischen Bodenfeuchtemessung auf einem Lößstandort mit etwa 2-3 Vol.% angesetzt werden kann. Außerdem wurden in den Modellrechnungen ab dem Simulationsbeginn 1989 auch Jahre mit extrem trockener Witterung einbezogen (siehe 3.1.4). Eine weitere Verbesserung der Bodenfeuchteschätzung ist durch die Einbeziehung eines komplexeren Pflanzenmodells zu erwarten.

Tab. 3.7: Abweichungen von Meß- und Modellwerten des Bodenwassergehaltes in 0-60 cm Tiefe (Zeitraum: 13.2.92 bis 28.4.94)

Variante	N	Einheit	RMS
Meßfeld 1	18	Vol.%	4.4
Meßfeld 2	18	Vol.%	4.3
Meßfeld 3	19	Vol%	3.6
Meßfeld 4	18	Vol%	4.2

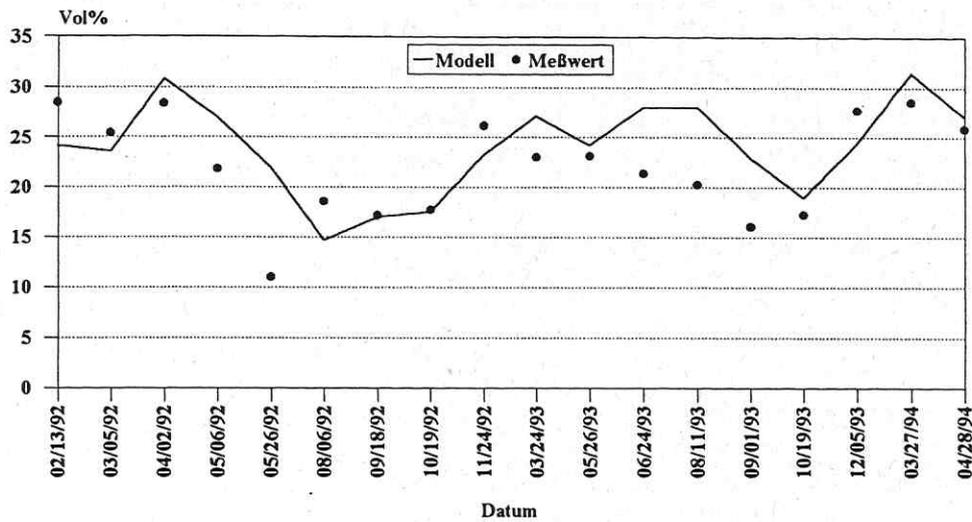


Abb. 3.12: Vergleich von Meß- und Modellwerten der Bodenfeuchte in 0-60 cm Tiefe, Meßfeld 1

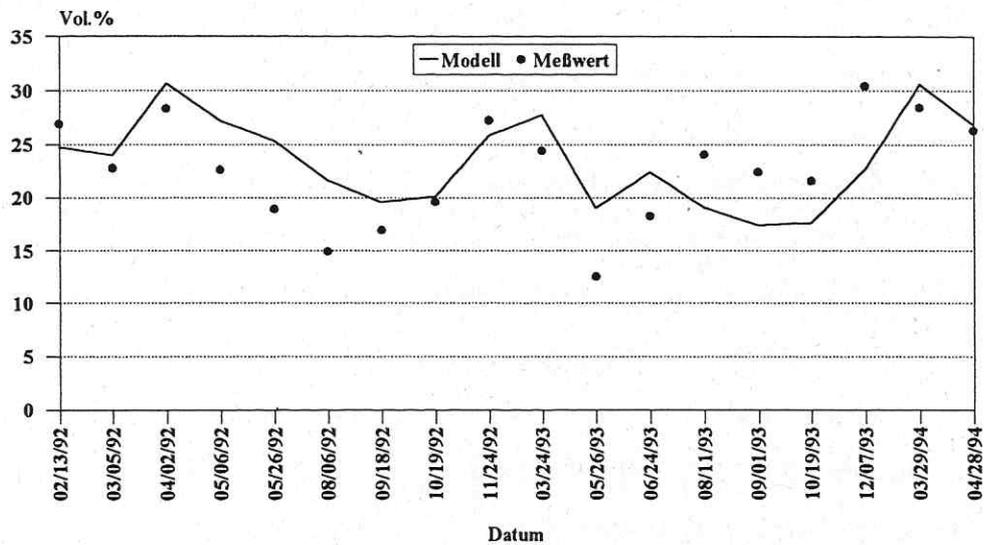


Abb. 3.13: Vergleich von Meß- und Modellwerten der Bodenfeuchte in 0-60 cm Tiefe, Meßfeld 2

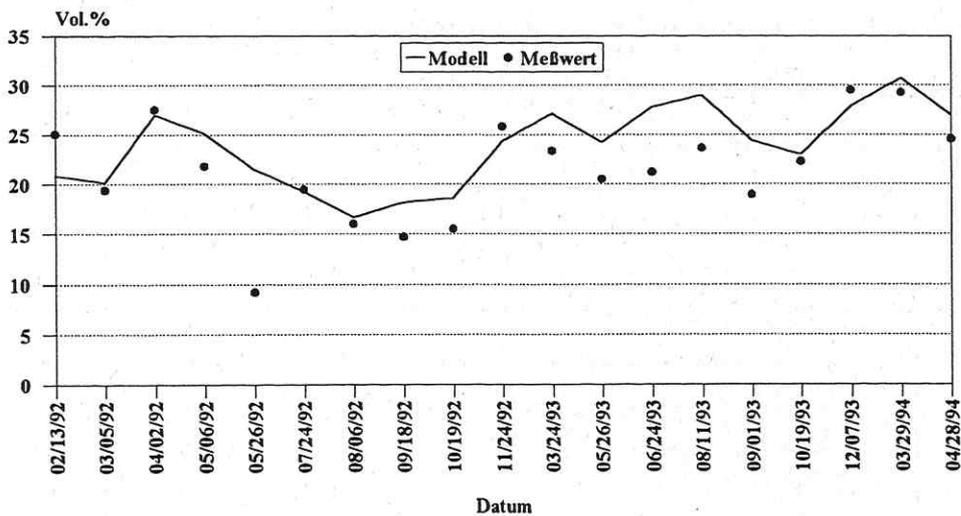


Abb. 3.14: Vergleich von Meß- und Modellwerten der Bodenfeuchte in 0-60 cm Tiefe, Meßfeld 3

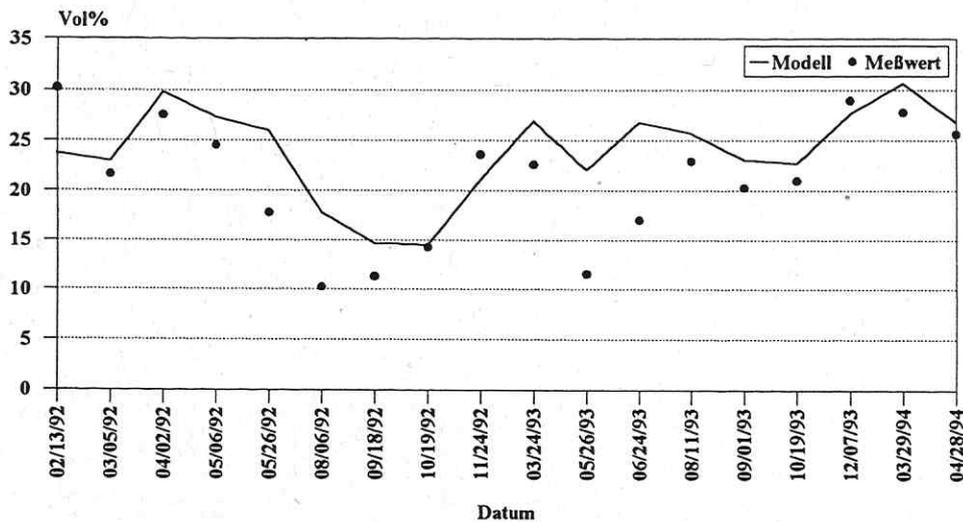


Abb. 3.15: Vergleich von Meß- und Modellwerten der Bodenfeuchte in 0-60 cm Tiefe, Meßfeld 4

• **Bodentemperatur:**

Für die Gegenüberstellung von Meß- und Modellwerten der Bodentemperatur wurde die Bodentiefe 5 cm gewählt. Die Messung erfolgte mit jeweils 2 parallel eingebrachten Sensoren, um dieses Tiefenniveau möglichst genau zu erfassen und durch die Sensorlage bedingte mögliche Meßfehler zu reduzieren. Die dargestellten Meßwerte sind aus den 10-minütigen Aufzeichnungen der Datenlogger berechnete Tagesmittelwerte, die Modellwerte stellen den Schichtmittelwert der von CANDY berechneten obersten Schicht (0-10 cm) dar. Die Abbildungen 3.15 bis 3.17 zeigen die gemessenen und simulierten Werte für die Fruchtarten Winterweizen, Zuckerrüben und Sommergerste. Die Bodentemperaturdynamik wird in allen 3 Fällen gut vom Modell abgebildet. Die Abweichung (RMS) zwischen Messung und Modell liegt für die ausgewählten Zeiträume in einer Größenordnung von etwa 2 K.

Tab. 3.8: Abweichungen von Meß- und Modellwerten der Bodentemperatur in 5cm Tiefe

Variante	N	Einheit	RMS
Zuckerrüben 1993	172	K	2,0
Winterweizen 1993	96	K	2,0
Sommergerste 1994	116	K	1,6

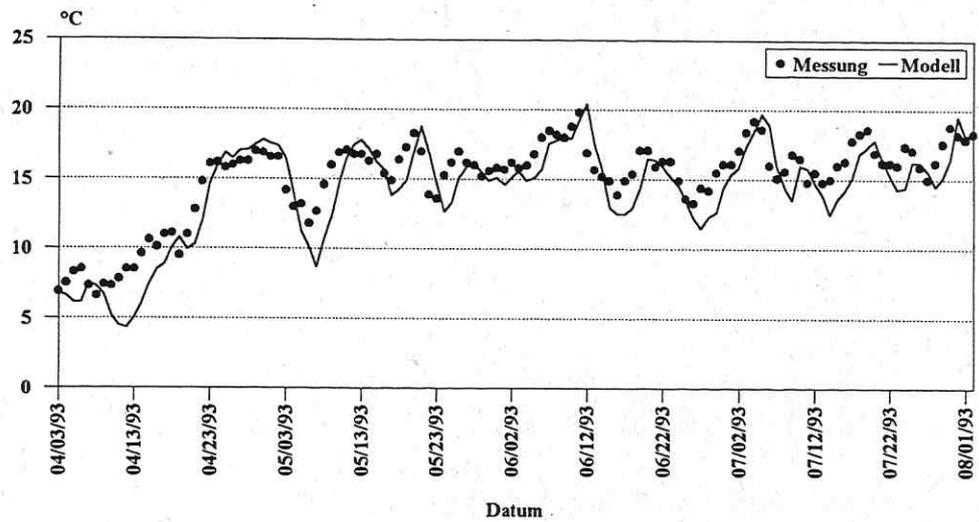


Abb. 3.16.: Vergleich von Modell- und Meßwerten der Bodentemperatur in 5 cm Tiefe unter Winterweizen

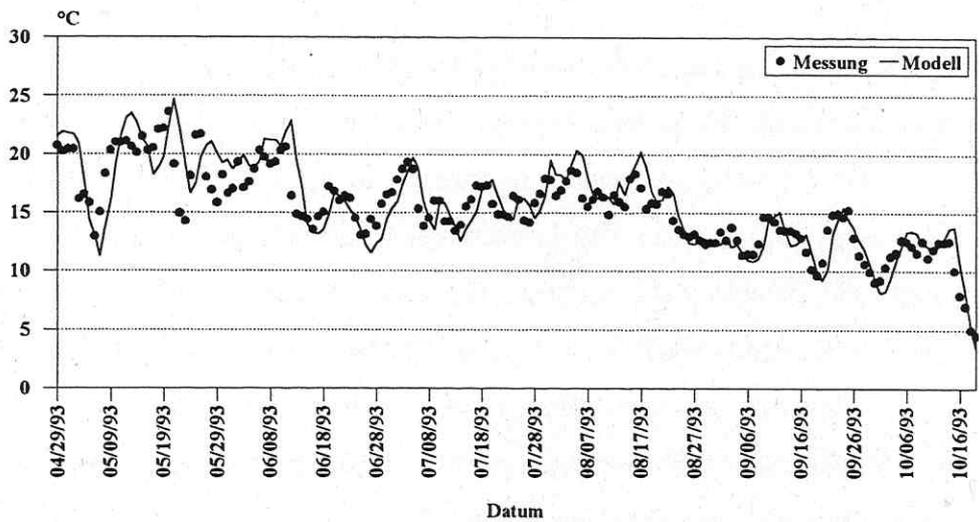


Abb. 3.17: Vergleich von Modell- und Meßwerten der Bodentemperatur in 5 cm Tiefe unter Zuckerrüben

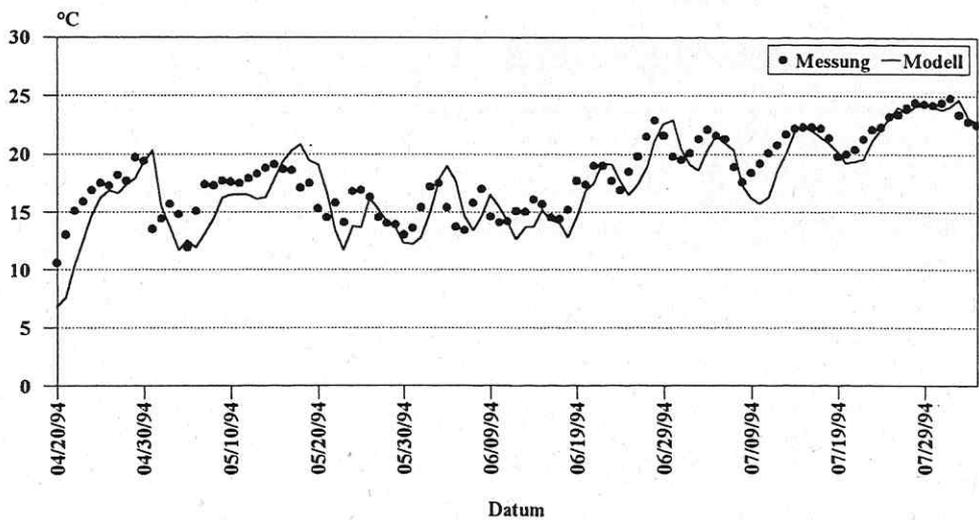


Abb. 3.18: Vergleich von Modell- und Meßwerten der Bodentemperatur in 5 cm Tiefe unter Sommergerste

- **Anorganischer Stickstoff in 0-60cm Tiefe**

Die Gegenüberstellung von Meß- und Simulationsergebnissen des Bodenstickstoffs wird nachfolgend für den Zeitraum Frühjahr 1992 bis Frühjahr 1994 für die Bodentiefe 0-60 cm durchgeführt. Der Modellstatus wurde in diesem Zusammenhang an die jeweiligen Meßwerte vom 13.2.92 (bei Variante 3.1 vom 7.5.92) angepaßt. Bei der Berechnung der Abweichungen (RMS) wurden Wertepaare mit eindeutigen „Ausreißern“ bei den Meßwerten in zeitlicher Nähe zu Düngungsterminen (Mai 1992 bzw. Mai 1993) nicht einbezogen. Die Ursache für die zu hohen Meßwerte ist in der z.T. starken Austrocknung des Bodens durch fehlenden Niederschlag bzw. Vorfrucht- und Vorjahreswirkungen und die damit eingeschränkte Einmischung des Düngers in den Oberboden zu sehen (siehe auch Bodenfeuchtemeßwerte in diesem Abschnitt) . Hohe, bei der Probenahme vom Bohrer aufgenommene Stickstoffkonzentrationen führten zur Verfälschung der Analysenergebnisse. Eine Ursache für die im untersuchten Zeitraum vorhandene Abweichung (RMS) von etwa 30 bis 40 kg/ha wird in den Folgen der Extrembedingungen vorangegangener Trockenjahre gesehen. Ein Blick auf die zweite Hälfte des untersuchten Zeitraumes (1993/94), in dem wieder günstigere Witterungsbedingungen vorherrschten, zeigt ein tendenziell besseres Modellergebnis. Die Überschätzung des Bodenstickstoffgehaltes durch CANDY im Herbst 1993 nach Winterweizen (Variante 2.1) kann leicht nach unten korrigiert werden, da auf dem Versuch eine starke Selbstbegrünung von Ausfallgetreide erfolgte, die erst durch die Herbstfurche vollständig beendet wurde. Dieser Vorgang wurde nicht durch die Simulation erfaßt. Nicht abgebildet wurde offensichtlich auch der starke Anstieg des Stickstoffniveaus bei Kartoffeln im Jahr 1992 (Variante 2.1). Möglicherweise bedingten die Kartoffeldämme eine verstärkte Mineralisierung. Der fast notreife Sommergerstenbestand 1992 (Variante 3.1) könnte seinen Stickstoff aufgrund der extremen Trockenheit nach Zuckerrüben aus tieferen Schichten als im Modell abgebildet entnommen haben. Auch das relativ stabile Niveau des Bodenstickstoffgehaltes (Meßwerte) bei Zuckerrüben 1992 (Variante 4.1) trotz eines N-Entzuges von ca. 320 kg/ha scheint Prozesse als Ursache zu haben, die von CANDY nicht beschrieben werden konnten.

In Tabelle 3.9 sind die Abweichungen für den Gesamtzeitraum aufgeführt.

Tab. 3.9: Abweichungen von Meß- und Modellwerten des Mineralstickstoffgehaltes in 0-60cm

Variante	N	Einheit	RMS
1.1	16	kg/ha	33.9
2.1	15	kg/ha	40.6
3.1	14	kg/ha	30.5
4.1	15	kg/ha	40.5

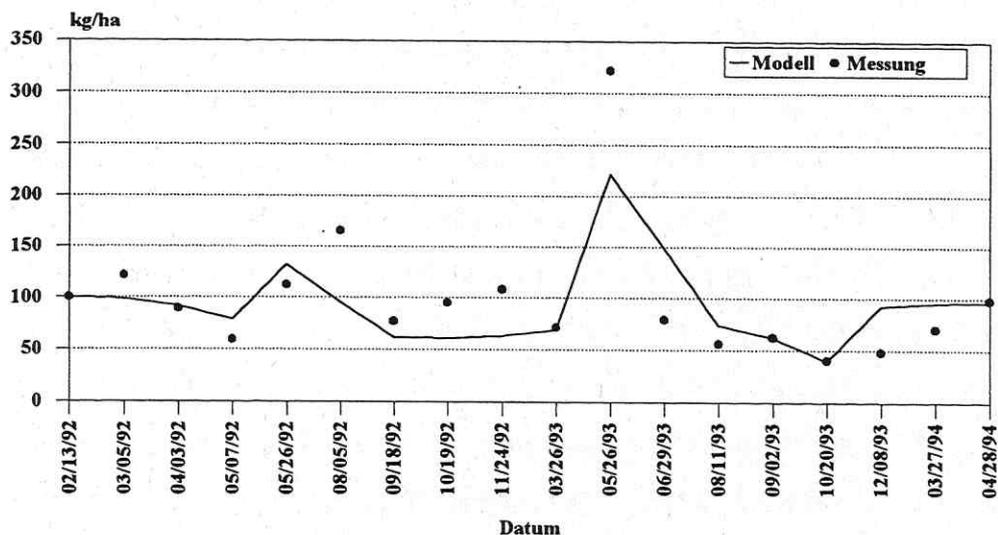


Abb. 3.19: Vergleich von Meß- und Modellwerten des anorganischen Stickstoffs in 0-60 cm Tiefe Meßfeld 1.1

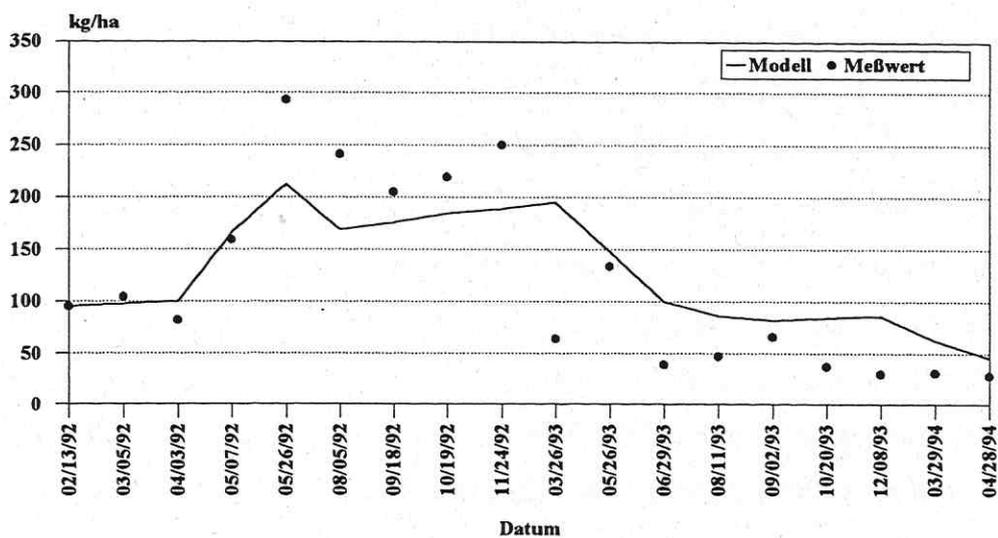


Abb. 3.20: Vergleich von Meß- und Modellwerten des anorganischen Stickstoffs in 0-60 cm Tiefe, Meßfeld 2.1

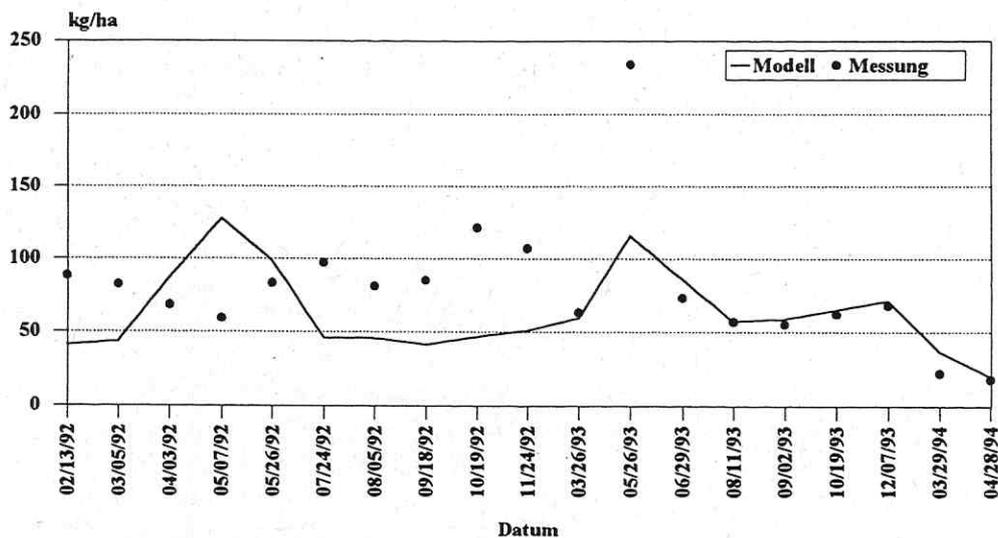


Abb. 3.21: Vergleich von Meß- und Modellwerten des anorganischen Stickstoffs in 0-60 cm Tiefe, Meßfeld 3.1

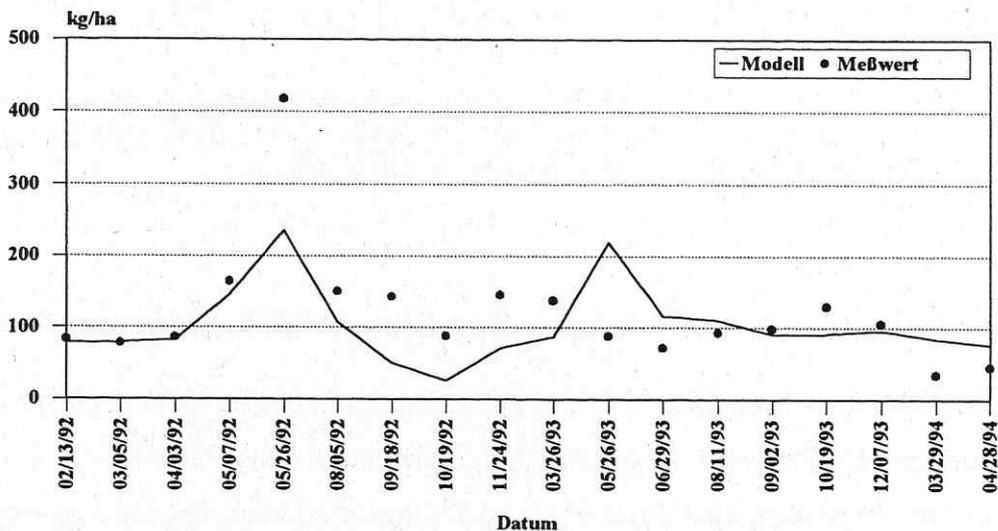


Abb. 3.22: Vergleich von Meß- und Modellwerten des anorganischen Stickstoffs in 0-60 cm Tiefe, Meßfeld 4.1

### 3.2. OS - Akkumulation im Statischen Versuch Bad Lauchstädt

Die Validierung der beschriebenen Modellvorstellungen zur OS-Akkumulation erfolgte auf Grundlage von Daten des Statischen Versuchs Bad Lauchstädt. Dabei wurden die Erträge und die  $C_t$ -Werte des Statischen Versuchs Lauchstädt nach KÖRSCHENS (1994) für alle Düngungsvarianten aus der Periode 1989-1992 herangezogen.

In Abb. 3.23 ist der simulierte Verlauf der C-Akkumulation ausgewählter Düngungsvarianten im Vergleich zur Kontrollvariante dargestellt. Der mittlere quadratische Fehler beim Vergleich von Simulation und Messung beträgt 0.04%  $C_{org}$ . Die Abbildung zeigt, daß sowohl die

Differenzierung zwischen den einzelnen Düngungsvarianten als auch der zeitliche Verlauf der OS-Akkumulation vom Modell gut abgebildet werden.

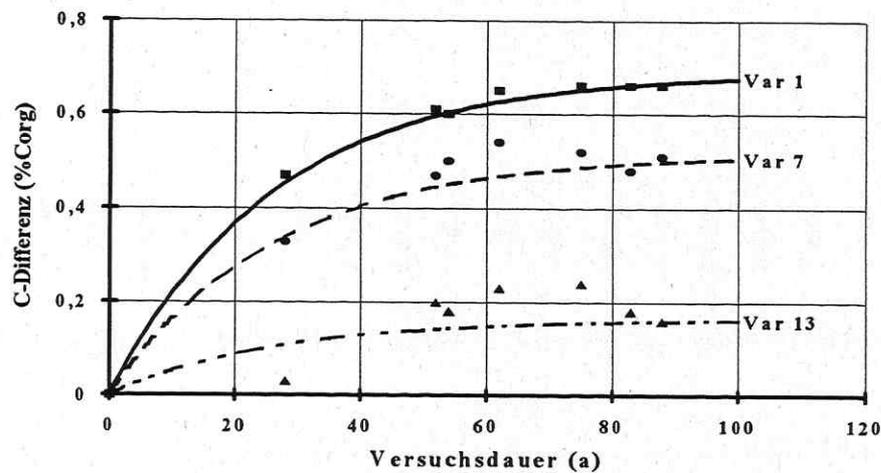


Abb.3.23 : Verlauf der OS-Akkumulation im Statischen Versuchs Lauchstädt (Var 1: 300 dt/ha Stalld. in 2 Jahren + NPK, Var 7: 150 dt/ha Stalld. in 2 Jahren + NPK, Var 13: NPK) als Differenz zum C-Gehalt der Kontrollvariante. Linien: Modell, Symbole: Meßwert

#### 4. Integration des Simulationsmodells in ein geographisches Informationssystem

Um die vom Simulationsmodell CANDY abgebildeten Bodenprozesse für größere Areale (Gesamtgebiet eines Betriebes, Agrarlandschaft...) untersuchen und bewerten zu können, ist der Bezug der Simulationsergebnisse zur realen Fläche erforderlich. Gleichzeitig müssen die erforderlichen Standortangaben aus vorhandenen Unterlagen (z.B. Karten) abgeleitet werden. Es ist vorhersehbar, daß die Betrachtung der Prozesse auf territorialer Ebene durch die Bildung homogener Einheiten (Patches) zu einer großen Anzahl von Teilflächen führt. Der dementsprechende Simulationsumfang erfordert den Einsatz möglichst einfacher Modelle, um den Rechenzeitbedarf in praktisch überschaubaren Grenzen zu halten.

Ein Landschaftselement wird in diesem Zusammenhang beschrieben durch

- Topographie (Abgrenzung der Bewirtschaftungseinheiten)
- Bodeneinheit (Standortregionaltypen)
- Klimatyp
- Niveau der Nmin-Versorgung
- Niveau der OPS-Versorgung.

Jede dieser Informationsschichten wird durch eine entsprechende Karte repräsentiert,

wobei die beiden letztgenannten vereinfachend an die Schlagkartierung (Topographie) gekoppelt werden können. Durch Überlagerung aller Informationsebenen im GIS (Abb. 4.1) erhält man als homogen anzusehende Teilflächen, auf die eindimensionale Modelle anwendbar sind.

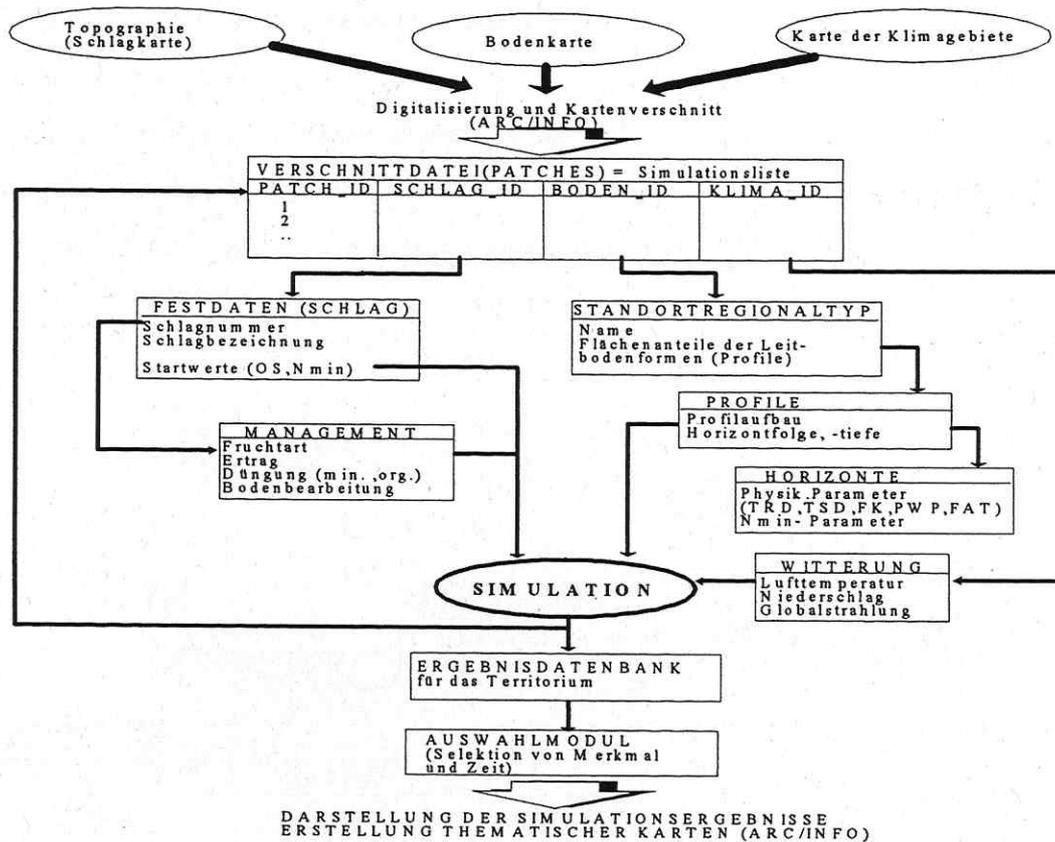


Abb. 4.1: Schematischer Ablauf des Datenflusses bei der Kopplung des Simulationsmodells CANDY mit dem Geographischen Informationssystem ARC/INFO

Im Ergebnis dieser Überlagerung wird eine Liste aller Patches mit Zeigern zu den jeweiligen Datenbeständen hinsichtlich Bewirtschaftung, Wetter und Bodenform erzeugt. Die Abfolge der Bewirtschaftungsmaßnahmen wird mit Hilfe des durch CANDY in der bisherigen Form bereitgestellten Datenbankinstrumentariums verwaltet. Damit ist auch die Übernahme vorhandener Datenbestände gewährleistet. Die Eingabe der Bewirtschaftungsdaten erfolgt über eine bedienerfreundliche Nutzeroberfläche und entspricht der Führung einer Schlagkartei. Beim gegenwärtigen Stand der Informationsbereitstellung wird davon ausgegangen, daß die Managementdaten für den gesamten Schlag gültig sind.

In Abb. 4.2 ist die Datenstruktur für die Beschreibung von Agrarlandschaften dargestellt. Die zentrale Datei *Territorium* enthält das Ergebnis der Überlagerung von Boden-, Klima- und

Schlagkarte. Jeder kartographischen Einheit zum *Standort* in der Bodenkarte wird der entsprechende STANDORTREGIONALTYP zugeordnet, der über die *Bodenprofil* - Datei auf die jeweiligen *Horizonte* verweist. *Schlagdaten* und *Massnahmen* sind über das Feld SCHLAGNUMMER miteinander verbunden und enthalten gemeinsam die Informationen der Schlagkartei. Durch die Trennung von BODENNUTZUNG und SCHLAGNUMMER wird eine dezentrale Datenverwaltung bzw. die Integration unterschiedlicher Schlagkarteien, aber auch die Integration anderer Nutzungsformen in ein Gesamtsystem möglich. In den *Schlagdaten* sind neben allgemeinen Festdaten auch Informationen zu der bisherigen Bewirtschaftung enthalten, die zur Ableitung der Startwerte dienen.

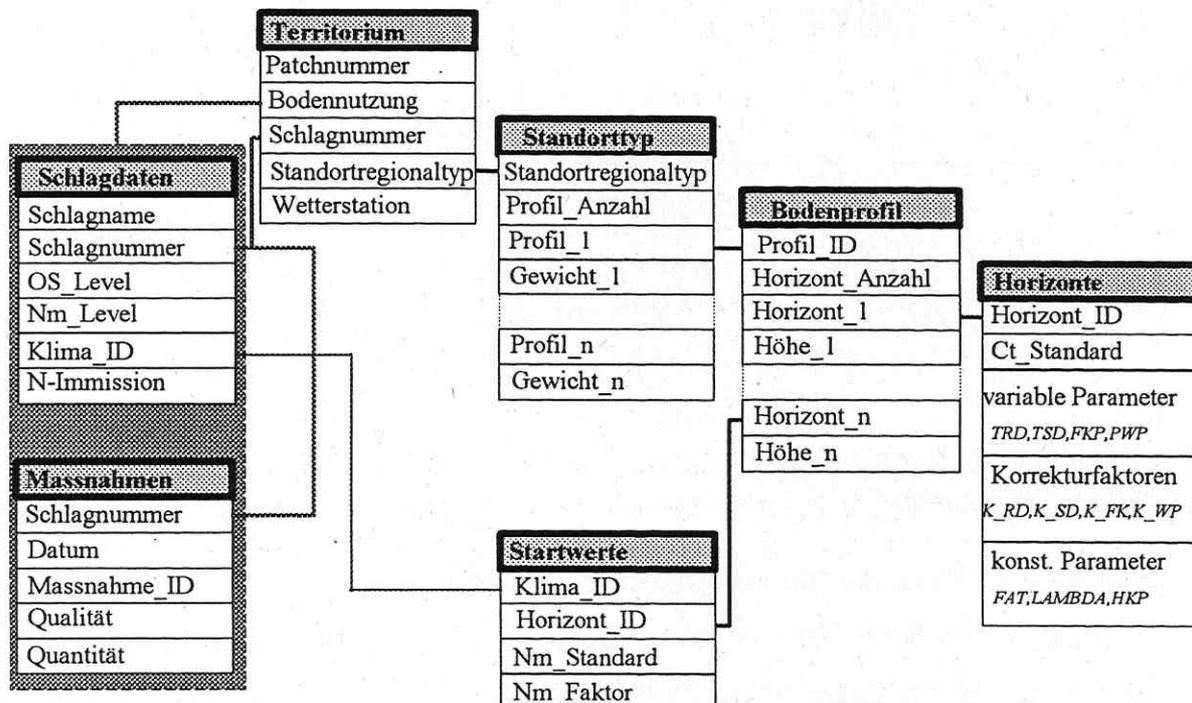


Abb. 4.2 : Datenbankstruktur bei der Kopplung des Simulationsmodells CANDY mit dem Geographischen Informationssystem ARC/INFO

Der Parameter OS\_LEVEL beschreibt den mittleren jährlichen Input an reproduktionswirksamen Kohlenstoff ( $C_{rep}$ ) in t/ha. Der Zeiger KLIMA\_ID ermöglicht den Zugriff auf die Jahresmittelwerte von Lufttemperatur (LTEM) und Niederschlagsmenge (NIED).

#### 4.1 Bestimmung der Bodenparameter und Anfangsbedingungen

Die beim Übergang von einzelnen Plots zur Beschreibung von Agrarlandschaften hauptsächlich zu lösenden Probleme sind die Ableitung plausibler Startwerte und die Generierung der erforderlichen Bodenparameter aus den vorhandenen Standorterhebungen und Bodenkartierungen, da im Gegensatz zur Behandlung einzelner Schläge keine flächendeckenden experimentellen Bestimmungen möglich sind. Dabei ist zu berücksichtigen, daß durch unterschiedliche Versorgung einzelner Schläge mit organischer Substanz auch eine Modifikation der Bodeneigenschaften erfolgt.

Zur Bestimmung der Startwerte für die umsetzbare organische Substanz wird von einer Angabe des mittleren jährlichen Kohlenstoffinputs der bisherigen Bewirtschaftung ausgegangen (OS\_LEVEL). Diese Daten sind aus mittleren Erträgen und dem mittleren Anfall an organischen Düngern abzuleiten. Um daraus das Niveau an umsetzbarer organischer Substanz berechnen zu können, muß die standorttypische WMZ eines mittleren Jahres bekannt sein (vgl. 2.2). Damit diese Größe ohne aufwendige Voraussimulationen berechnet werden kann, wurde nach einem Regressionsmodell gesucht, mit dessen Hilfe eine hinreichend genaue Schätzung der mittleren Umsatzaktivität unter Verwendung vorliegender Standortdaten möglich ist.

Als Einflußgrößen kommen die bodenphysikalischen Parameter, das Standortklima sowie der Pflanzenbestand (bzw. die Fruchtfolge) in Frage, da sie Bodentemperatur und -wassergehalt bestimmen. Von experimentellen Untersuchungen her ist bekannt, daß der Abbau organischer Substanzen wesentlich durch die Textur des Bodens beeinflusst ist (KÖRSCHENS, 1980). Der Feinanteilgehalt des Bodens als ein wesentliches Texturmerkmal wurde deshalb als bodenspezifische WMZ-Einflußgröße für die aufzustellende Regressionsbeziehung ausgewählt.

In numerischen Experimenten zeigte sich, daß der Einfluß verschiedener Fruchtfolgen auf den Jahres-WMZ-Wert gering war, sofern man sinnvolle, dem Standorttyp entsprechende Fruchtarten in den Rotationen unterstellte. Entsprechend wurde der Fruchtfolgeeinfluß in dem Regressionsansatz vernachlässigt.

Als Witterungsgrößen wurden das Jahresmittel der Lufttemperatur (LTEM) und die Jahresniederschlagsmenge (NIED) in die Regressionsbeziehungen aufgenommen. Die Globalstrahlung als weitere in Bodenzustandsmodellen häufig verwendete Witterungsgröße in

der speziellen Form des Jahresmittels verbesserte die Anpassungsgüte der untersuchten Regressionsmodelle unwesentlich und wurde deshalb nicht einbezogen.

Die für die Parametrisierung einer Regressionsbeziehung notwendigen 'Beobachtungen' der WMZ wurden aus Simulationsläufen gewonnen. Dazu erfolgte aus einer Witterungsdatenbank eine Auswahl der Beobachtungsergebnisse von 11 Stationen, von denen jeweils mindestens 15 Jahre Witterungsaufzeichnungen vorlagen und die den gesamten Wertebereich standortspezifischer Kombinationen von Lufttemperatur und Niederschlag möglichst gut überdeckten (Abb. 4.3).

Die Witterungsdaten wurden zur Parametrisierung des bereits beschriebenen Wettergenerators verwendet (vgl. 2.3). Um den Einfluß der verschiedensten Kombinationen von Fruchtarten und speziellen Jahreswitterungen berücksichtigen zu können, wurden Langzeitsimulationen über 40 Rotationen mit dreigliedrigen Fruchtfolgen durchgeführt und deren Ergebnisse gemittelt.

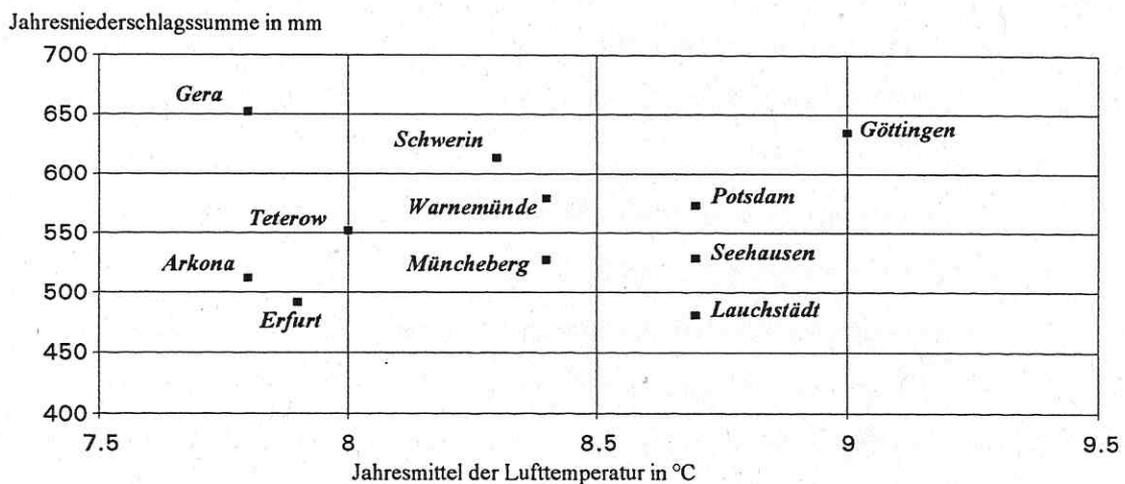


Abb. 4.3: Graphische Darstellung der Jahrescharakteristika der ausgewählten Wetterdaten von 11 Stationen

Zur Ableitung einer Näherungsformel für den Jahreswert der WMZ wurden mit der Witterung der in Abb. 4.3 aufgeführten Standorte Simulationsläufe auf verschiedenen Stufen des Feinanteilgehaltes (FAT) zur WMZ-Bestimmung durchgeführt (vgl. Tabelle 4.1). Eine erste statistische Untersuchung der Simulationsergebnisse zeigte, daß die WMZ-Variabilität deutlich besser durch die Größe FAT als durch die Kombination der Witterungsgrößen Lufttemperatur (LTEM) und Niederschlag (NIED) beschrieben werden konnte. Im Ergebnis der statistischen Betrachtung verschiedener polynomialer Ansätze in LTEM und NIED bei jeweils konstanten FAT-Stufen entstand letztlich das folgende Modell:

$$WMZ(FAT, LTEM, NIED) = P_0(FAT) + P_1(FAT) * LTEM + P_2(FAT) * NIED. \quad (4.1)$$

Die Parameter  $P_0$ ,  $P_1$  und  $P_2$  wurden für die FAT- Stufen 6, 8, 11.5, 22, 32 und 44 M% bestimmt und sind gemeinsam mit weiteren Resultaten der Regressionsrechnung mit Modell (4.1) in Tabelle 4.1 aufgeführt. Für beliebig große FAT-Werte verwendet man die Ergebnisse aus Tab. 4.1 und interpoliert linear. Die mittlere Abweichung der Modellwerte und der Simulationsergebnisse übersteigen den Wert von 1 d nicht, was im Rahmen der erreichbaren Genauigkeiten als ausreichend angesehen werden kann.

Tabelle 4.1: Zusammenstellung der Regressionsergebnisse nach (4.1) für verschiedene Werte des Feinanteils (FAT) : Schätzwerte der Koeffizienten ( $P_0, P_1, P_2$ ), Wurzel aus mittlerer quadratischer Abweichung zwischen Daten und Modell (RMS) und Bestimmtheitsmaß (B)

FAT (Masse-%)	$P_0$	$P_1$	$P_2$	RMS (in d)	B
6	9,0870	3,3541	0,015698	0,96	0,81
8	10,2234	3,1825	0,01325	0,92	0,79
11,5	14,5547	3,0629	0,003204	0,80	0,77
15	23,0218	2,1824	-0,009797	0,58	0,82
22	23,6263	2,1698	-0,02726	0,83	0,87
32	22,9473	2,0054	-0,03232	0,97	0,86
44	22,9300	1,8676	-0,03178	0,94	0,87

Die Ermittlung des  $N_{\min}$ -Startwertes erfolgt auf Grundlage des Parameter  $NM\_LEVEL$ , der einen Index für das Niveau der mineralischen N -Versorgung liefert. Der Wertebereich erstreckt sich von 1 bis 5, wobei 3 den "normalen" Zustand charakterisiert. In Abhängigkeit von klimatischen Bedingungen und Bodeneigenschaften sind in *Startwerte* typische  $N_{\min}$ -Mengen ( $NM\_STANDARD$ ) in einer Bodenschicht von 10 cm und die Korrekturen für eine Einheit des  $NM\_LEVEL$  ( $NM\_FAKTOR$ ) zusammengefaßt. Dieses Vorgehen erwies sich als geeignet, um für eine hinreichende Flexibilität bei der Bestimmung der Anfangswerte zum  $N_{\min}$ -Gehalt zu sorgen. Um auch große bewirtschaftungsbedingte Unterschiede im OS-Haushalt abbilden zu können, werden die vom OS-Gehalt abhängigen bodenphysikalischen Parameter an die aktuellen  $C_t$ -Werte angepaßt. Zu diesem Zweck enthält die Datei *Horizonte* für die Bodenkrume Standardwerte für Trockenrohichte (TRD), Trockensubstanzdichte (TSD), Feldkapazität (FKP), permanenten Welkepunkt (PWP), den entsprechenden  $C_t$ -Wert und die Korrekturfaktoren (Änderung pro Einheit  $C_t$ ) für diese Parameter.

## 4.2. Darstellung der Ergebnisse

Die Simulation für die einzelnen Patches erfolgt durch mehrere in einem Netzwerk parallel arbeitende Rechner und wird von einer zentralen Liste aus verwaltet. Diese Steuerliste basiert auf der Datei *Territorium* und enthält zusätzlich Angaben zur bearbeitenden PC-Station und zum Zustand der Bearbeitung (unbearbeitet, in Bearbeitung, Abschlußcode der Bearbeitung). Die Simulationsergebnisse für die Teilflächen des Untersuchungsgebietes werden in einer Datenbank gespeichert und nach Abschluß der Simulationen für das gesamte Territorium für eine kartographische Darstellung mit Hilfe des GIS aufbereitet.

Tab.4.2: Zustandsgrößen für Kartendarstellung

Bewirtschaftung	Simulationsergebnisse	bodenphysikalische Parameter
Stickstoffdüngung (min.) organische Düngung Bestand/Fruchfolge stationäres C-Niveau (Humusbilanz)	biologische Aktivität (WMZ) Bodentemperatur u. -feuchte NO <sub>3</sub> - bzw. NH <sub>4</sub> - Stickstoff N-Austräge Wasserperkolations Wasserbilanz umsetzb. OBS-Kohlenstoff OPS-Kohlenstoff u. Stickstoff	Wasserkapazität Welkepunkt Trockenrohdichte Trockensubstanzdichte Porenvolumen Feinanteilgehalt Versickerungsparameter

Zur Darstellung können verschiedene Zustandsgrößen (vgl. Tabelle 4.2) für variable Zeiträume selektiert und miteinander verknüpft werden. Der Algorithmus zum Aufbau thematischer Karten ist in Abb. 4.4 schematisch dargestellt.

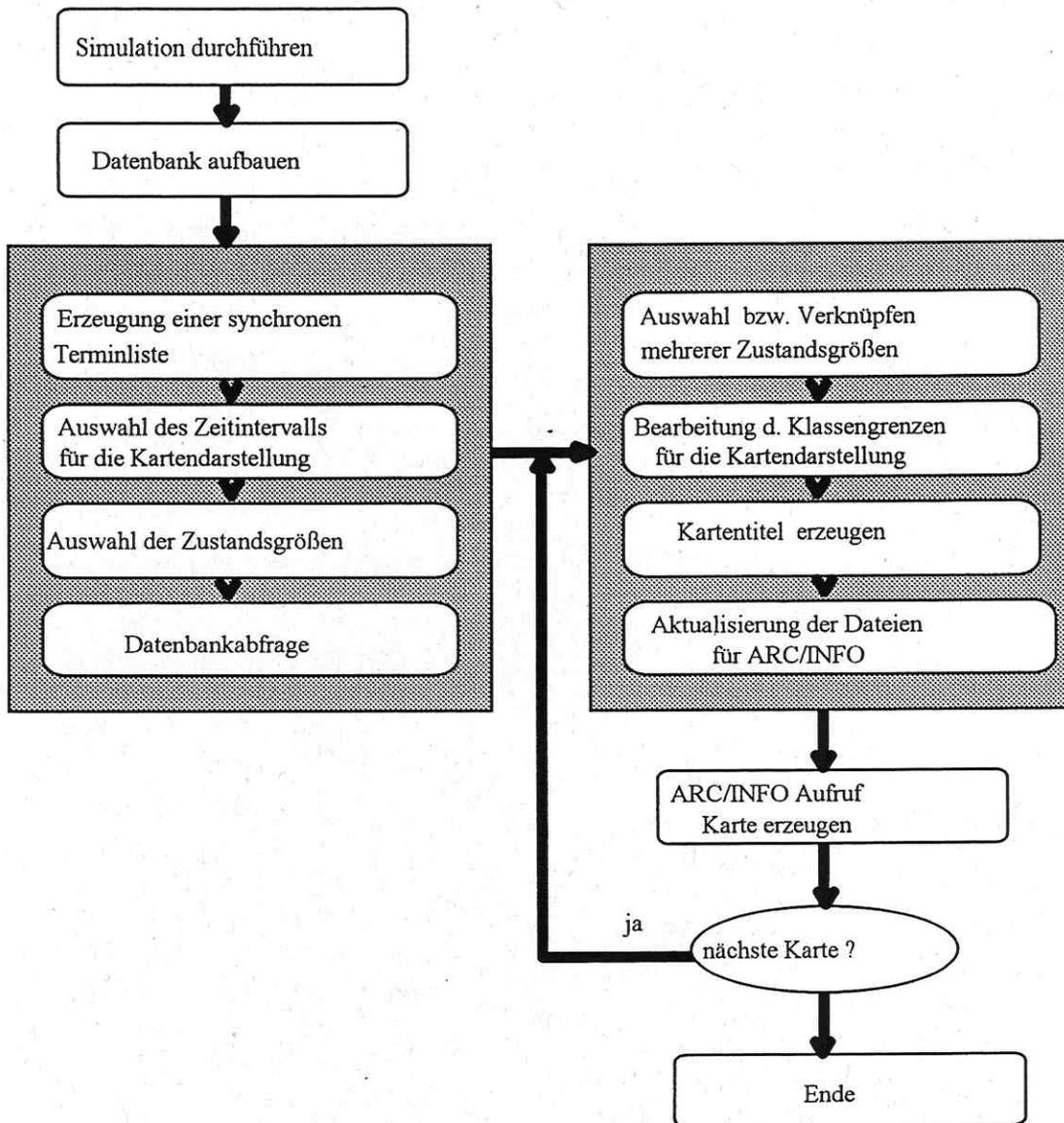


Abb. 4.4: Schematischer Ablauf der Ergebnisdarstellung

## 5. Anwendung des Systems auf ein Territorium im Gebiet der Querfurter Platte

In der vorgestellten Lösung erfolgte eine Kopplung des Simulationssystems CANDY an ARC/INFO für ein ca. 7500 ha großes Testgebiet auf der lößbestimmten Querfurter Platte im östlichen Regenschatten des Harzes (< 500 mm mittlerer Jahresniederschlag).

Informationsgrundlage waren neben den Daten einer Wetterstation die Topographie und die Bodenkarte für das betrachtete Gebiet.

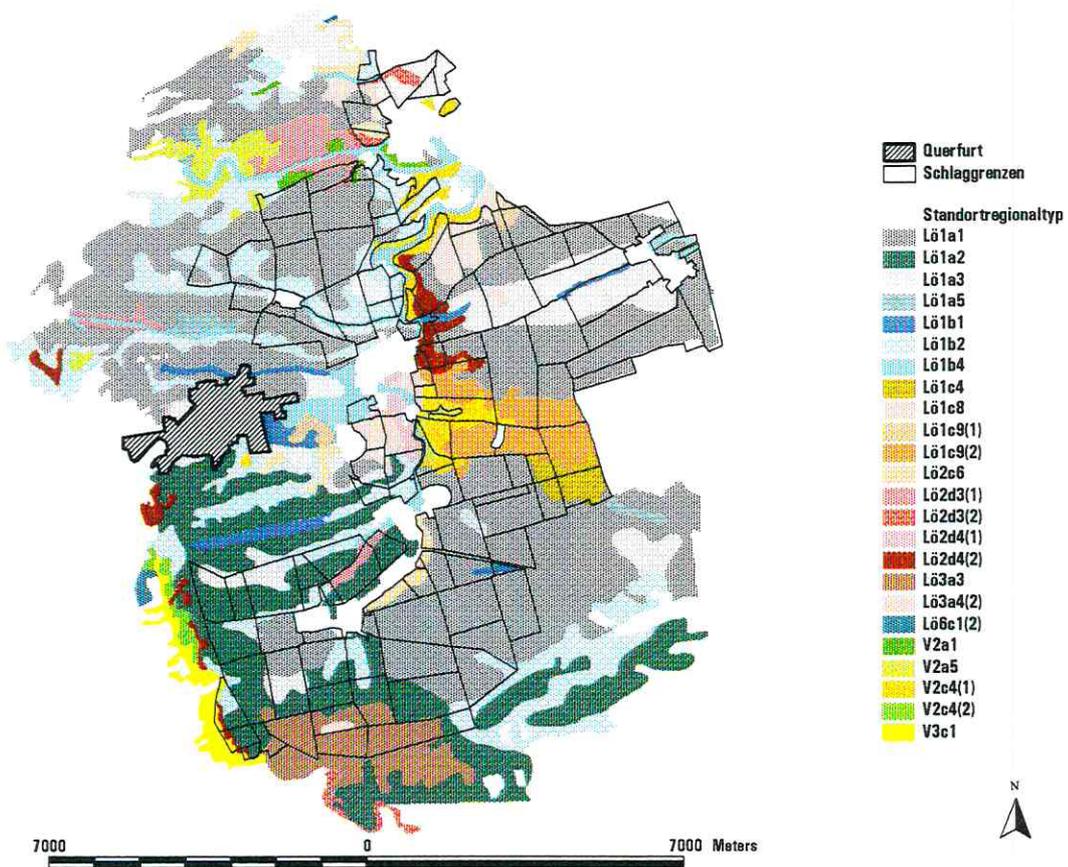


Abb. 5.1.: Überlagerung von Boden- und Bewirtschaftungseinheiten (Querfurter Platte)

### 5.1. Bodendaten

Die Grundlage für die territorialen Bodendaten bilden die Erhebungen der Mittelmaßstäbigen Landwirtschaftlichen Standortkartierung (MMK), die als Kartierungseinheit die Standortregionaltypen abgrenzen. Standortregionaltypen werden durch Gesellschaften definierter Bodenformen beschrieben, die sich jeweils in Leitbodenformen unterschiedlicher Flächenanteile und typische Begleitbodenformen differenzieren lassen (LIEBEROTH, 1982).

In Tabelle 5.1. sind die Flächenanteile der Standortregionaltypen (gruppiert nach Standorttypen) für das untersuchte Gebiet zusammengestellt.

Tab. 5.1: Flächenanteile der Standortregionaltypen im Untersuchungsgebiet (zusammengefaßt zu Standorttypen)

Standorttyp	Böden	Fläche in ha	Flächenanteil in %
Lö1a	Lößbestimmte Schwarzerden	4997	66,3
Lö1b	Lößbestimmte Schwarzerden mit Staunässe- u./o. Grundwassereinfluß	850	11,3
Lö1c	Lößtieflehm- u./o. lößtiefenbestimmte Schwarzerden	791	10,5
Lö2c	Decklößbestimmte Schwarzerden	76	1,0
Lö2d	Löß- und berglehmbestimmte Schwarzerden u./o. Rendzinen	268	3,6
Lö3a	Lößbestimmte Parabraunerden und Fahlerden	308	4,1
V2a, V2c, V3c	Berglehme (vernässungsfrei, z.T. lößbeeinflußt)	244	3,2

Für jede innerhalb des Standortregionaltyps vorkommende wesentliche Bodenform wird für die Kopplung von CANDY und ARC/INFO ein typisches Profil definiert, den Horizonten dieser Profile werden die für das Simulationsmodell CANDY erforderlichen bodenphysikalischen Parameter zugeordnet.

Zunächst werden die in der Bodenformbezeichnung enthaltenen Informationen über die Substrat- und Horizontabfolge entschlüsselt. Bei der Definition der Horizonte innerhalb eines Profils wird die Tiefenstufe des Substratwechsels berücksichtigt. Für Bodenformen der Schwarzerden erfolgte die Festlegung dieser Tiefenstufe unter Verwendung der Angaben von ALTERMANN und SCHRÖDER (1992) zur mittleren Mächtigkeit der Lößschicht.

Der Bearbeitungshorizont wird für jede Bodenform als Schicht 0-30 cm festgelegt.

Für Bodenformen mit Gesteinsunterlagerung wird die Bodentiefe auf 100 cm begrenzt.

Bei der Profilbeschreibung fließen die von STROHBACH und SCHMIDT (1982) angegebenen bodenphysikalisch relevanten Differenzierungsmerkmale der Standortregionaltypen ein.

Die erforderlichen physikalischen Parameter wurden für gut beschriebene Profile (z.B. Löß-Schwarzerde, Löß-Parabraunerde) direkt aus der Literatur (KUNDLER, 1989) übernommen.

Bei unzureichender Beschreibung einzelner Bodenformen oder Horizonte wurden die Parameter unter Berücksichtigung der Körnung aus verschiedenen Quellen abgeleitet. Eine wichtige Informationsbasis für die Abschätzung von Trockenrohdichte, Feldkapazität und Welkepunkt stellen dabei die von VETTERLEIN (1989) angegebenen bodenphysikalischen Kennwerte für Substrat-Horizont-Gruppen dar. Der Feinanteilgehalt wurde neben den

Angaben für Schwarzerden von ALTERMANN und SCHRÖDER (1992) nach den Richtwerten für den Ap-Horizont sowie den krumennahen Unterboden von MORGENSTERN (1990) definiert. Falls für ein Profil nur Angaben zum Tongehalt vorhanden waren, wurde für Lößböden auf die von VETTERLEIN und EBERT (1989) herausgestellten Beziehungen zwischen Tongehalt und Feinanteilgehalt Bezug genommen.

Bei fehlenden Angaben zur Feldkapazität und Welkepunkt wurden diese unter Zuhilfenahme der von LIEBEROTH (1982) angegebenen Regressionsgleichungen aus dem Gehalt an abschlämmbaren Teilchen ( $d < 20 \mu\text{m}$ ) bzw. dem Tongehalt abgeschätzt. Für die Festlegung von Trockenrohddichte und Trockensubstanzdichte wurden in diesem Fall die körnungsabhängigen Angaben von PETELKAU (1983) bzw. KUNDLER (1989) für die oberen Bodenhorizonte herangezogen.

Um den Einfluß der organischen Substanz zu quantifizieren, erfolgt die Parameterberechnung für die variablen Parameter über einen Normalwert und einen Korrekturwert, der die Änderung des jeweiligen Parameters pro  $0,1\%C_t$  wiedergibt. Die Basis für die Festlegung der Änderungsfaktoren für die bodenphysikalischen Eigenschaften in Abhängigkeit von der Versorgung des Bodens mit organischer Substanz bilden die Untersuchungen von KÖRSCHENS (1988) und PFEFFERKORN (1990).

Bei der Festlegung der Startwerte wurde ähnlich vorgegangen. Für jeden Horizont wurde ein Normalwert und ein Korrekturwert für den Gehalt an mineralischem Stickstoff ( $N_{\text{min}}$ ) festgelegt. Über die Schlagdaten erfolgt eine qualitative Einstufung in fünf Versorgungsstufen, nach denen in Verbindung mit einem Klimatyp die Korrektur des  $N_{\text{min}}$ -Startwertes zur Ausführungszeit erfolgt. Bei der Abschätzung des OS-Startwertes wird von der mittleren Zufuhr an organischer Primärschubstanz (OPS) und der aus Feinanteilgehalt und Klimatyp abgeleiteten mittleren biologischen Aktivität ausgegangen.

## **5.2. Bewirtschaftungsszenario**

Ausgehend von den Angaben eines 6500 ha bewirtschaftenden Agrarunternehmens über die in den folgenden Jahren zu erwartende Anbau- und Tierbesatzstruktur wurden erste Szenario-rechnungen für das Simulationsgebiet auf der Querfurter Platte durchgeführt.

Unter Zugrundelegung der Fruchtartenrelationen (Abb. 5.2.) wurden 7 Fruchtfolgen generiert und den der Größe nach geordneten Schlägen zugeordnet (vgl. Tab. 5.1).

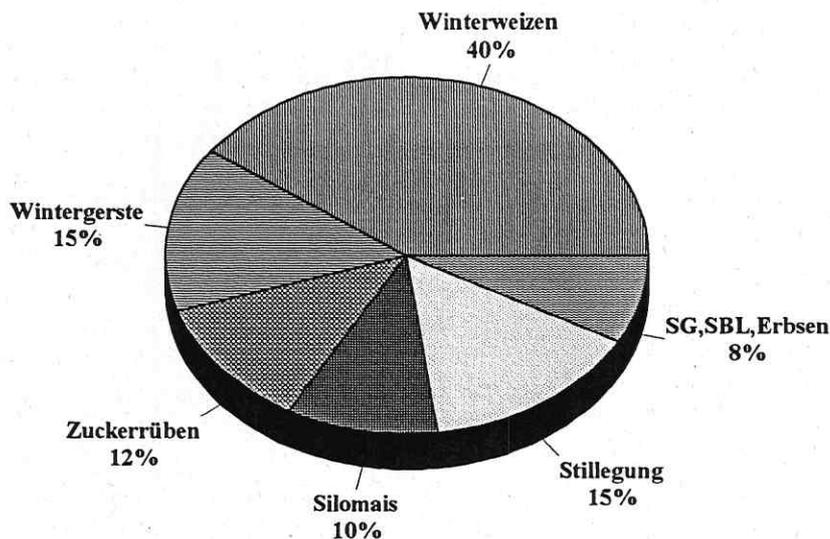


Abb. 5.2.: Anbauverhältnis der Fruchtarten

Als Zielderträge für die einzelnen Fruchtarten werden generell die höchsten Schätzerträge (nach KINDLER, 1992) für das Gebiet angesetzt. Damit soll gewährleistet werden, daß im Modell die jeweils boden- und witterungsabhängigen maximalen N-Entzüge realisiert werden können. Die mineralische N-Düngung wurde nach den vom Agrarunternehmen vorgegebenen betrieblichen Richtwerten in Abhängigkeit von der Fruchtart in die Vorgaben für die Szenariorechnungen integriert. Die in die Maßnahmedateien der Bewirtschaftungsszenarien eingetragenen fruchtartbezogenen Standardangaben sind in Tabelle 5.2. zusammengefaßt.

Tab. 5.2.: Aufbau der Fruchtfolgen für die Simulationsrechnungen Querfurter Platte (Bezeichnung der Fruchtarten siehe Tabelle 5.3.)

Fruchtfolge	Anbaufläche in ha								
1	1026	ZR	WW	WG	W.-Raps	WW	SM	WW	
2	1037	WW*	WG	W.-Raps	WW	SM	WW	ZR	
3	1050	Erbsen	W.-Raps	WW	SM	WW	ZR	WW	
4	1092	SBL	WW	SM	WW	ZR	WW	WG	
5	1117	SG	SM	WW	ZR	WW	WG	W.-Raps	
6	1208	SM	WW	ZR	WW	WG	W.-Raps	WW	
7	1004	SG	ZR	WW	WG	W.-Raps	WW	SM	

(\* im Modell als Durumweizen gerechnet)

Tab.5.3.: Fruchtartenbezogene Standardwerte für Bewirtschaftungsszenarien

Fruchtart	Kurzname	Aufgang am	Ernte am	Zielertrag [dt/ha]	Mineraldüngung [kg N/ha]*	Org. Düngung [pro ha]
Zuckerrüben	ZR	15.4.	15.10.	510	60	200 dt Stallmist 35 m <sup>3</sup> Gülle (Rind)
Winterweizen	WW	20.10.	1.8.	76	60+60	-
Wintergerste	WG	5.10.	20.7.	73	70+60	-
Sommergerste	SG	30.3.	20.7.	60	40	-
Silomais	SM	10.5.	20.9.	520	100	200 dt Stallmist 35 m <sup>3</sup> Gülle (Rind)
Winterraps	W.-Raps	10.9.	20.7.	35	80	15 +20 m <sup>3</sup> Gülle (Schwein)
Erbsen	Erbsen	15.4.	20.7.	35	-	-
Sonnenblumen	SBL	10.5.	1.8.	35	70	-

(\* Angaben der Mineraldüngung betreffen Szenarien mit 100% N-Aufwand)

Von den 15% stillzulegenden Flächen fallen 80% unter eine 6-jährige Rotationsbrache (50% Raps als nachwachsender Rohstoff, 50% Aktivbegrünung). Vereinfachend wurde in den ersten Szenariorechnungen davon ausgegangen, daß auf dem gesamten Stilllegungsanteil Raps (zur Energieerzeugung) angebaut wird.

Aus den Bestandszahlen der Tierproduktion (18000 Schweine, 5000 Rinder) wurden über Koeffizienten (Faustzahlen, 1993, GÖRLITZ et al., 1991) die Anfallmengen an organischer Substanz (Stallmist, Gülle) abgeschätzt und innerhalb des Bewirtschaftungssystems gleichmäßig auf der Fläche des Simulationsgebietes verteilt. In den Szenarien wird das Rübenblatt grundsätzlich als organischer Dünger behandelt, hingegen wird Getreidestroh vom Feld abgefahren und vollständig in der tierischen Haltung eingesetzt. Zur modellinternen Berechnung des Kohlenstoffstartniveaus ist die Angabe des Versorgungszustandes mit organischer Substanz (mittlerer jährlicher Input von reproduktionswirksamen Kohlenstoff in t/ha) erforderlich. Dieses Input-Level wurde für das Gesamtgebiet abgeschätzt und für erste Rechnungen zunächst nicht zwischen den Schlägen differenziert. Für die Abschätzung wurde zur Vereinfachung ein Fruchtartenverhältnis 60% Getreide, 20% Zuckerrüben und 20% Silomais unterstellt. Die in der ehemaligen DDR typische Verwertung der Koppelprodukte (Getreidestroh, Rübenblatt) wurde dabei berücksichtigt, so daß sich die pflanzenbezogene OS-Zufuhr des Bodens auf die Ernte- und Wurzelrückstände (EWR) beschränkt. Da der EWR-Anfall ertragsabhängig variiert, sind für Getreide 65 dt/ha, für Zuckerrüben 450 dt/ha sowie für Silomais 400 dt/ha als mittlere Erträge angenommen worden. Unter Berücksichtigung des

mittleren N-Gehaltes, des C/N-Verhältnisses sowie des Synthesekoeffizienten wurde für die Ernte- und Wurzelrückstände ein mittlerer jährlicher  $C_{REP}$ -Fluß von 0.42 t/ha ermittelt. Für die Abschätzung der C -Anfallmengen aus organischer Düngung wurde der für die N-Bilanz des Kreises Querfurt angegebene Wert (NOLTE et al., 1991) von 77 kg/ha N aus Wirtschaftsdüngern als Basis gewählt. Wiederum vereinfachend wurde der Anfall von Wirtschaftsdüngern auf Stallmist und Gülle in gleichem Verhältnis beschränkt. Bei einem angenommenen mittleren C/N-Verhältnis von Stallmist und Gülle von ca. 14 :1 und einem Synthesekoeffizienten von 0,6 wurde für den mittleren jährlichen  $C_{REP}$ -Input aus der Tierhaltung für das Gebiet ein Wert von 0,66 t/ha berechnet. Als Summe des durchschnittlichen  $C_{REP}$ - Anfalls wurde somit für die Simulationsrechnungen von 1.08 t/ha ausgegangen.

Mit oben genannten Annahmen wurden 4 Szenarien gerechnet. Dabei wurden 2 Klimavarianten (aktuell und Prognose für das Jahr 2034) mit 2 Intensitätsstufen der mineralischen N-Düngung (100%, 75%) kombiniert.

### **5.3 Wetterdaten und Klimaszenarien**

#### **• Die Witterungsdaten für den Standort Bad Lauchstädt**

Für die Ableitung der Witterungsszenarien für den Standort Bad Lauchstädt waren Daten aus zwei Quellen verfügbar:

- Pentadenmittel der Lufttemperatur sowie Pentadensummen des Niederschlages von 1896-1955
- Tagesmittel der Lufttemperatur, Tagesniederschlagsmenge und tägliche Sonnenscheindauer seit 1956, ermittelt durch Ablesung nach den Vorschriften des Meteorologischen Dienstes bzw. des Deutschen Wetterdienstes.

Im Rahmen des bearbeiteten Projektes konnte weiterhin eine automatische Wetterstation vom Typ FMA86 installiert werden, die durch die Erfassung zusätzlicher Meßgrößen in hoher zeitlicher Auflösung eine neue Qualität von Modellentwicklung und -validierung ermöglicht (siehe 3.1.3).

Aus den o.g. langjährigen Wetteraufzeichnungen wurden die in Tabelle 5.3 zusammengestellten Mittelwerte für den Standort Bad Lauchstädt berechnet.

Tab. 5.4. Mittelwerte bestimmter Witterungselemente in verschiedenen Zeiträumen

Witterungsgröße	langjähriges Mittel		Mittel von 1958-1993	Mittel von 1984-1993
Jahresmittel der Lufttemperatur [°C]	1896-1993	8,7	9,0	9,2
Jahresniederschlagsmenge [mm]	1896-1993	476,4	463,4	381,3
Jahresmittel der Globalstrahlung [J cm <sup>-2</sup> ]	1952-1993	909,5	898,3	934,6

Für Langzeitsimulationen mit dem Simulationssystem CANDY wird zur Bereitstellung der Witterungseingangsgrößen ein Wettergenerator benutzt (s. Abschnitt 1.4.1).

Die Parametrisierung des Generators für den momentanen Witterungszustand in Bad Lauchstädt erfolgte mit Wetterbeobachtungen von 1958-91. Die Globalstrahlungswerte sind umgerechnete Werte der Sonnenscheindauer. In Tab. 5.5 sind die im Wettergenerator realisierten, monatstypischen Werte aufgelistet.

Tab.5.5: Monatstypische Mittelwerte von Lufttemperatur (LTEM) und Globalstrahlung (GLOB) sowie Monatssummen des Niederschlags (NIED) im Wettergenerator für den momentanen Klimazustand in Bad Lauchstädt

Monat	LTEM (°C)	NIED (mm)	GLOB (J cm <sup>-2</sup> )
1	-0,1	24,7	222,0
2	0,7	22,7	412,9
3	3,9	30,7	734,9
4	8,1	39,0	1149,1
5	13,2	52,4	1549,7
6	16,5	56,7	1685,5
7	18,0	45,8	1624,8
8	17,6	55,4	1375,0
9	14,2	33,8	973,3
10	9,6	33,0	571,6
11	4,6	31,2	267,6
12	1,3	31,5	168,8
1-12	9,0	456,9	896,9

In Abb.5.3 sind als Beispiel synthetische Wetterdaten für ein Jahr graphisch dargestellt, die mit dem Wettergenerator aus Abschnitt 2.3 erzeugt wurden.

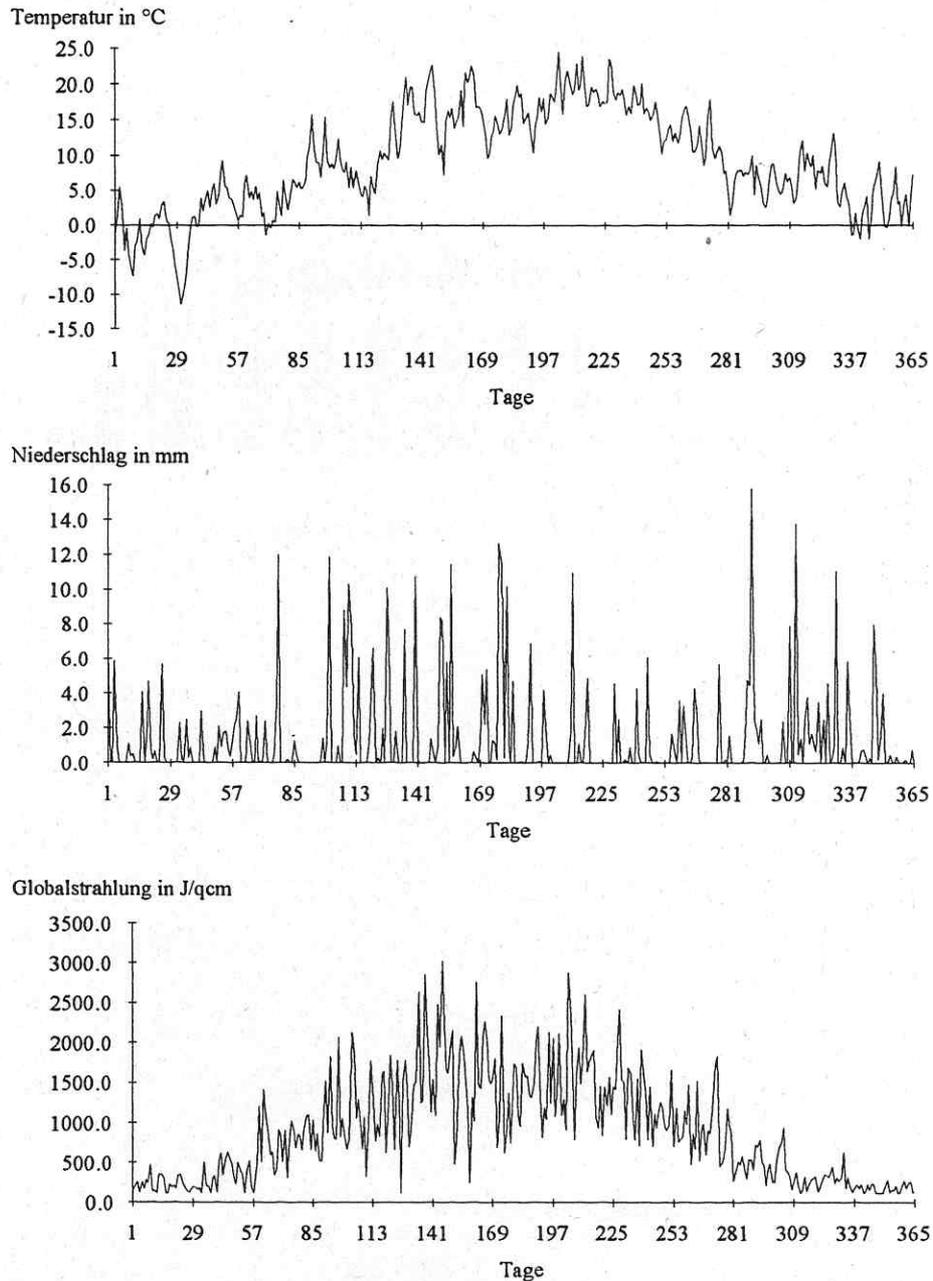


Abb. 5.3: Synthetische Jahresgänge von LTEM, NIED und GLOB am Standort Bad Lauchstädt, momentaner Klimazustand

Im Ergebnis der Methoden aus Abschnitt 2.3.4 läßt sich weiterhin der Klimazustand in Bad Lauchstädt für zukünftige Zeitpunkte (bei unterstellter Entwicklung der Menschheit nach dem Szenario 'business-as-usual') aus dem Wettergenerator vom Ist-Zustand sowie Informationen aus Klimamodellrechnungen gewinnen. Als Beispiel werden die dem unterstellten Zustand im Jahre 2034 entsprechenden, charakteristischen Werte der Witterungsgrößen LTEM, NIED und GLOB in Tab. 5.6 angegeben.

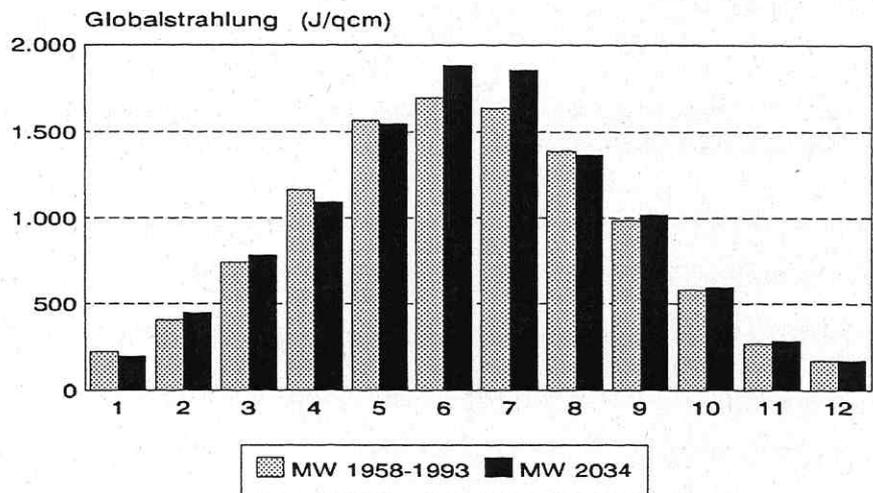
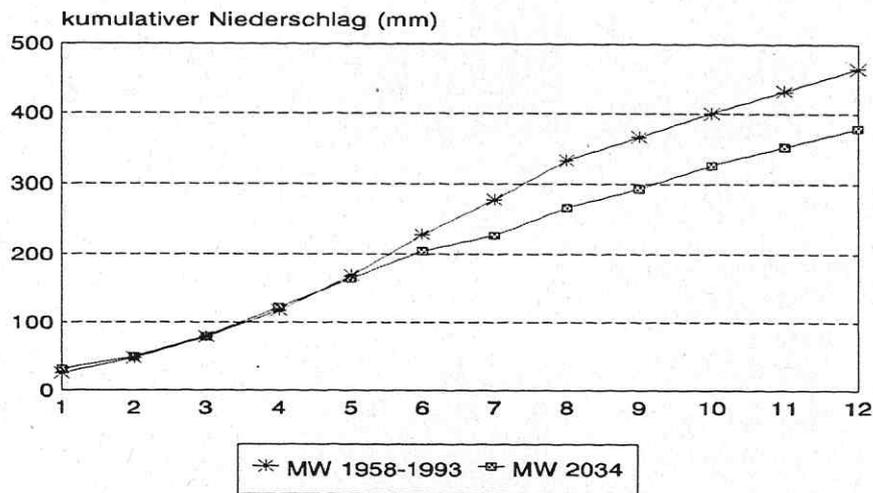
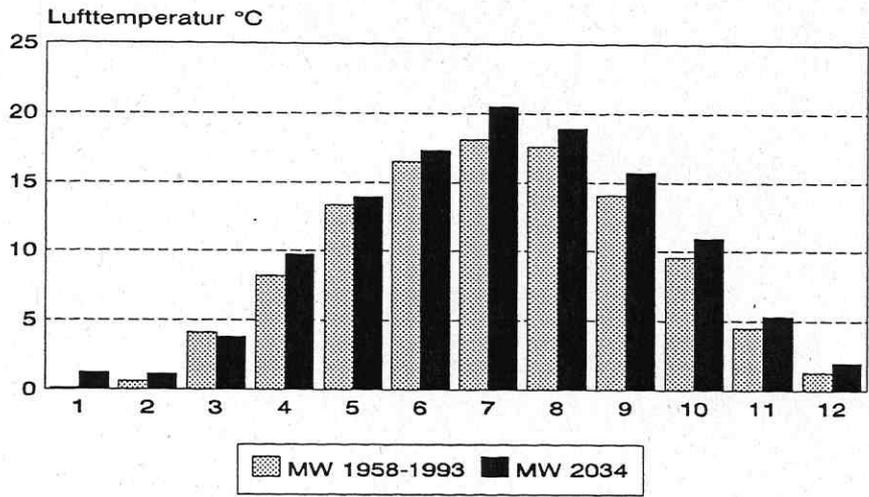


Abb. 5.4: Monatsmittelwerte (MW) der Lufttemperatur, kumulative Monatsniederschläge sowie Monatsmittel der Globalstrahlung für den Standort Bad Lauchstädt

Tab.5.6: Monatstypische Mittelwerte (MW) von Lufttemperatur (LTEM) und Globalstrahlung (GLOB) sowie Monatssummen des Niederschlags (NIED) im Wettergenerator für den unterstellten Klimazustand in Bad Lauchstädt im Jahre 2034

Monat	LTEM (°C)	NIED (mm)	GLOB (Jcm <sup>-2</sup> )
1	1,2	31,4	197,8
2	1,1	18,0	447,0
3	3,8	29,8	780,9
4	9,7	43,0	1095,7
5	13,9	42,9	1550,9
6	17,3	39,7	1883,8
7	20,5	22,2	1859,1
8	18,9	39,5	1368,5
9	15,7	27,2	1020,6
10	10,9	33,3	595,8
11	5,3	25,9	284,6
12	2,0	26,4	171,6
1-12	10,1	379,3	940,3

• **Bereitstellung der Witterungsdaten für die Szenariorechnungen 'Querfurter Platte'**

Die Szenariorechnungen für die Querfurter Platte werden wegen der geringen Entfernung zum Standort Bad Lauchstädt (ca. 15 km) sowie ähnlicher Topographie beider Standorte mit den generierten Witterungsdaten für den Standort Bad Lauchstädt durchgeführt. Ein Vergleich der im Zeitraum seit März 1992 gemessenen LTEM, NIED und GLOB-Werte an beiden Orten unterstützt diese Herangehensweise. In Tabelle 5.7 sind wichtige meteorologische Daten für die beiden untersuchten Klimaszenarien gegenübergestellt.

Tab. 5.7: Jahreswerte von Lufttemperatur, Niederschlag und Globalstrahlung der Klimaszenarien am Standort Bad Lauchstädt

	Aktuelles Klima	Klima GCM 2034
Lufttemperatur [°C]	9,0	10,1
Niederschlagssumme [mm]	464,7	379,3
Globalstrahlung [J/cm <sup>2</sup> ]	907,3	940,3

**5.4. Ergebnisse der Szenariorechnungen**

Im folgenden Abschnitt werden wesentliche Ergebnisse der durchgeführten ersten Szenariorechnungen für das Gebiet auf der Querfurter Platte vorgestellt.

Es wird nochmals darauf verwiesen, daß das für den Zustand 2034 unterstellte Klima einen durch ein Globalszenario ermittelten möglichen Zustand charakterisiert. Das aktuelle

Bewirtschaftungssystem wurde in diesen Klimazustand exportiert, ohne den Übergang zu simulieren.

In Tabelle 5.8 sind die Flächenmittelwerte (bezogen auf ein Jahr) und Streuung wichtiger Zustandsgrößen für zwei Klimazustände gegenübergestellt. Bei der Berechnung der Flächenmittelwerte wurden die flächenabhängigen Gewichte der Werte für die simulierten Teilflächen (Patches) berücksichtigt.

Tab. 5.8: Simulationsergebnisse für 2 Klimazustände (100 % N-Düngung)

	<u>Aktuelles Klima</u> 100 % N-Dg.		<u>Klima GCM 2034</u> 100% N-Dg.	
	Mittelwert	S	Mittelwert	S
Biolog. Aktivität (WMZ) in d	29,0	3,1	34,6	2,4
N-Mineralisierung in kg/ha	94	6,0	102	4,4
Wasserperkolatation in mm	63	7,7	10	8,7
N- Verlagerung in kg/ha	1,4	0,9	0,5	0,4
N- Austrag in die Atmosphäre in kg/ha	brutto: 75 netto: 25	6,9	brutto : 68 netto: 18	2,9
Cums- Niveau im Gleichgewichts- zustand in dt/ha	278	-	234	-
Nmin in 0-200 cm Tiefe zum Ende der Simulation in kg/ha	87	22,7	128	27,2

Die im wärmeren Klima um ca. 5,6 Tage erhöhte biologische Aktivität führt zum Anstieg des OS-Umsatzes im Vergleich zum aktuellen Klimazustand.

Das für den Gleichgewichtszustand berechnete Niveau des umsetzbaren Kohlenstoffs liegt im Flächenmittel um 44 dt/ha niedriger als im Zustand des aktuellen Klimas, dieser Wert entspricht einem zusätzlichen jährlichen Abbau von ca. 40 dt Stallmist pro Hektar.

Verbunden mit dem erhöhten Abbau der organischen Bodensubstanz ist eine Veränderung des Stickstoffumsatzes im Boden. Die höhere mineralisierte N-Menge im wärmeren Klima wird durch einen in gleichem Maße verringerten mittleren atmosphärischen N-Austrag kompensiert. Die durch einen gestiegenen OS-Umsatz zu erwartende freigesetzte höhere N-Menge schlägt sich am deutlichsten in dem höheren Wert des im Bodenpool befindlichen Mineralstickstoffs nieder. Die N-Verlagerung aus dem Bodenprofil verringert sich in dem Schwarzerdegebiet aufgrund des bei wärmerem Klima noch höheren Wasserdefizites zusätzlich. Die ins Grundwasser eingetragenen N-Frachten haben damit allerdings auch höhere Konzentrationen als im aktuellen Klima.

Insgesamt scheint eine mögliche Klimaveränderung vor allem den Wasserhaushalt im mitteldeutschen Trockengebiet zu verändern. Bei Beibehaltung des Nutzungsanspruches der Kulturpflanzen verringert sich die Grundwasserneubildungsrate bei der unterstellten Bewirtschaftung im Mittel auf etwa 15 % des aktuellen Zustandes.

Deutlich positiv hinsichtlich einer Senkung von N-Austrägen wirkt sich unter beiden Klimazuständen die Verringerung der Aufwendungen der mineralischen N-Düngung auf 75 % aus. Insbesondere werden durch diese Maßnahme die atmosphärischen Austräge sowie die N-Mengen im Bodenprofil reduziert. In Tabelle 5.9 sind die entsprechenden Resultate der Modellrechnungen für die Varianten mit 75 % N-Aufwand zusammengestellt.

Tab.5.9: Simulationsergebnisse für 2 Klimazustände (75 % N-Düngung)

	<u>Aktuelles Klima</u> 75 % N-Dg.		<u>Klima GCM 2034</u> 75 % N-Dg.	
	Mittelwert	S	Mittelwert	S
Biolog. Aktivität (WMZ) in d	29,1	3,2	34,6	2,4
N-Mineralisierung in kg/ha	94	6,0	102	4,3
Wasserperkolations in mm	63	7,7	10	8,7
N- Verlagerung in kg/ha	0,9	0,6	0,4	0,3
N- Austrag in die Atmosphäre in kg/ha	brutto: 64 netto: 14	5,4	brutto: 53 netto: 3	3,3
Cums- Niveau im Gleichgewichtszustand in dt/ha	278	-	234	-
Nmin in 0-200 cm Tiefe zum Ende der Simulation in kg/ha	70	19,6	98	20,8

In den Abbildungen 5.5 bis 5.7 sind beispielhaft thematische Karten dargestellt, die die räumlich verteilte Ausprägung der Zustandsgrößen im Untersuchungsgebiet dokumentieren. Die Differenzierungen innerhalb der Bodendecke im Simulationsgebiet spiegeln sich erwartungsgemäß auch in diesen Ergebniskarten wider. So erfolgt die Cums-Abnahme (vgl. Abb.5.5) bei Oberböden mit relativ niedrigerem Feinanteilgehalt in der Krume (z.B. Standortregionaltypen mit Löß-Rendzinen) um geringere Absolutbeträge als das Flächenmittel von 44 dt/ha. Im Falle der Wasserperkolations (vgl. Abb. 5.6 und 5.7) führen die Unterschiede im Gesamtprofilaufbau zu räumlichen Differenzierungen innerhalb des betrachteten Territoriums. Bodeneinheiten mit geringeren Feinanteilgehalten im Oberboden bzw. Unterboden (z.B. sandunterlagerte Löss) sowie mit begrenzter Profiltiefe (Gesteinsunterlagerung) haben so beispielsweise relativ höhere Perkolationsmengen.

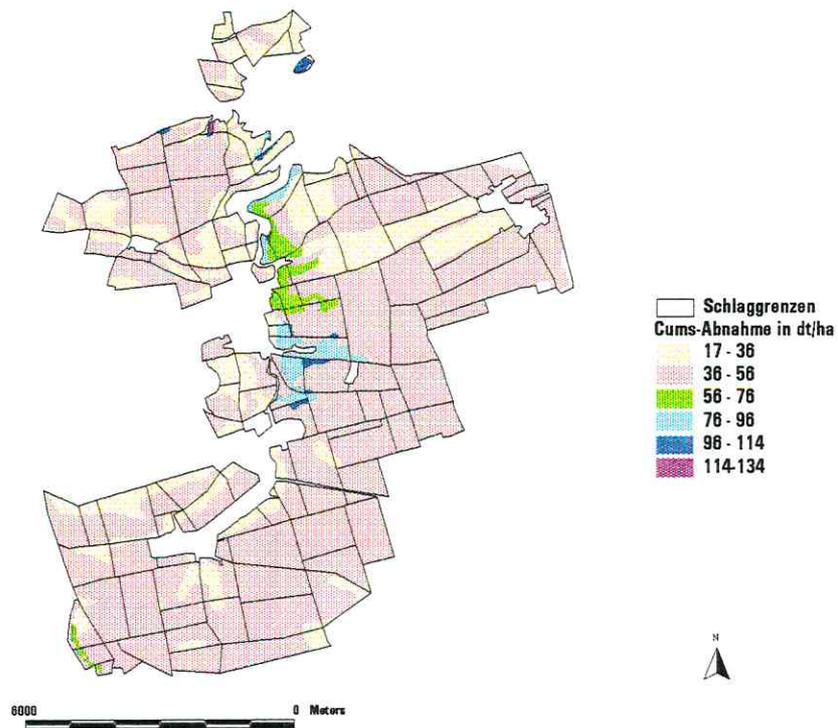


Abb.5.5: Cums - Abnahme durch eine Klimaveränderung (Aktuelles Klima --> GCM 2034)

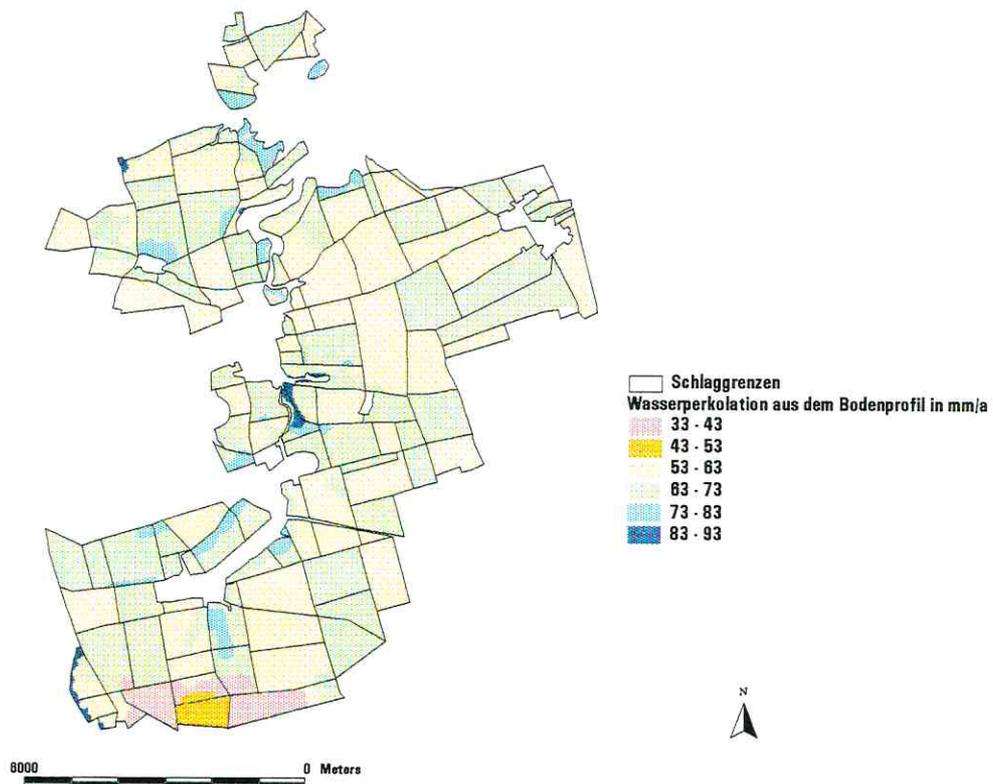


Abb.5.6 : Mittlere jährliche Wasserperkolatation aus dem Bodenprofil (aktuelles Klima)

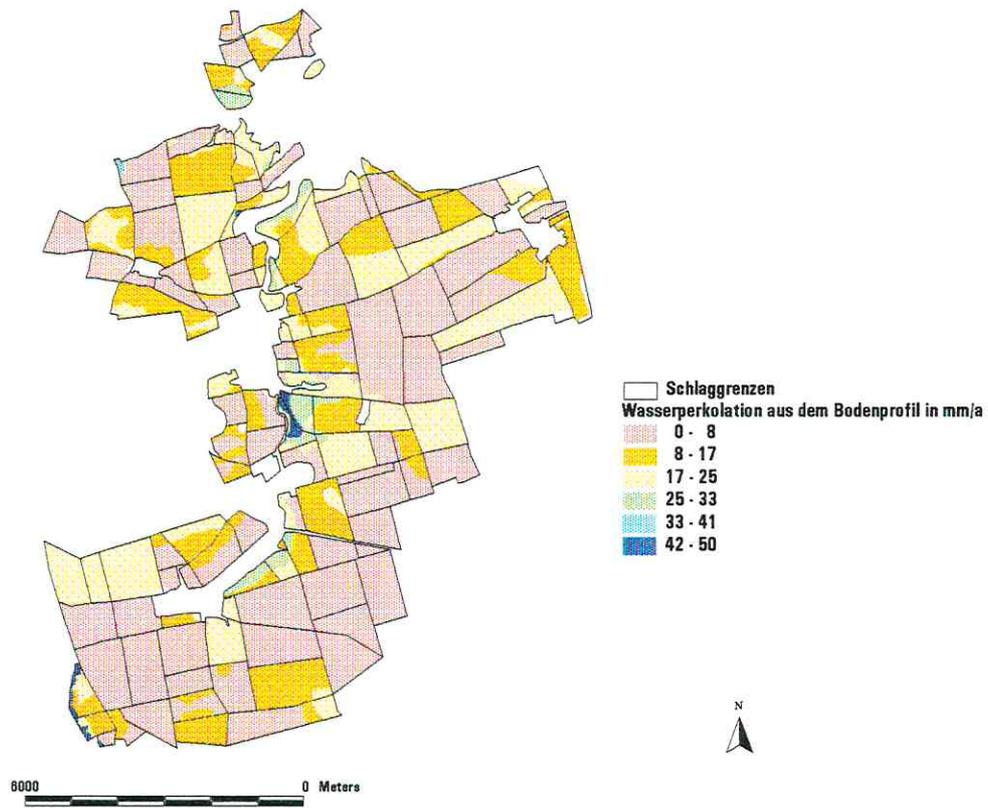


Abb.5.7.: Mittlere jährliche Wasserperkolations aus dem Bodenprofil (Klima: GCM 2034)

## 6. Diskussion und Schlußfolgerungen

Der in den vorangegangenen Jahren erzielte Entwicklungsstand des CANDY-Modells bot für die vorliegende Zielstellung günstige Voraussetzungen. Für eine Reihe unterschiedlicher Bedingungen lagen bereits positive Erprobungsergebnisse vor: Feldversuche (BUS, 1985, FRANKO, 1989, 1990), Kippenrekultivierung (FRANKO, 1989, 1990), Gemüsebau (FRANKO u. RÜHLMANN, 1991), praktische Landwirtschaft (FRANKO et al., 1991).

Die Bereitstellung der Bodenparameter konnte über die Kopplung des Modells an ein GIS zweckmäßig gelöst werden. Vor allem die zusätzliche Implementierung des Moduls zur laufenden Aktualisierung der physikalischen Bodeneigenschaften in Abhängigkeit vom aktuellen C-Gehalt des Bodens setzt den Anwender in die Lage, langfristige Rechnungen bei extremen Änderungen der Bewirtschaftung bzw. der Umsatzbedingungen durchzuführen. Dabei war die Integration eines Wettergenerators zur Untersuchung langfristiger Erscheinungen äußerst zweckmäßig, da derartig umfangreiche Wetteraufzeichnungen nur für sehr wenige Standorte vorliegen.

Die vorgestellte Methodik zur Ableitung lokaler Schätzungen der Klimaveränderung basiert auf Ergebnissen globaler Modellrechnungen und zeigt einen möglichen Weg, diese Informationen in plausible Wetterszenarien umzusetzen. Die hier vorgestellte Lösung ist vergleichbar mit der von GYALISTRAS et al., (1994) beschriebenen Vorgehensweise. Die auf diesem Weg gefundenen Daten stehen im Einklang mit den globalen Modellergebnissen und bieten eine bessere Grundlage als eine pauschale Annahme zur Temperaturerhöhung, wie sie in groben Abschätzungen (z.B. JENKINSON et al., 1991) benutzt wird. Vorteil der hier geschilderten Lösung ist, daß die Zusammenhänge zwischen den einzelnen meteorologischen Elementen erhalten bleiben. Die nach der hier beschriebenen Methode gebildeten Datensätze repräsentieren eine Entwicklungsmöglichkeit aus einer Vielzahl weiterer gleichberechtigter Witterungsverläufe. Damit bietet das beschriebene Vorgehen eine gute Möglichkeit, die entwickelten Modelle hinsichtlich ihrer Eignung für die zu lösende Fragestellung zu überprüfen und mögliche Einflüsse von Klimaveränderungen in grober Näherung abzuschätzen.

Die Modellvalidierung auf dem Meßfeld in Bad Lauchstädt zeigt, daß die Treffgenauigkeit der realisierten Modelle für die zu untersuchende Fragestellung ausreicht. Es wurde jedoch auch deutlich, daß vor allem für die Bedingungen extremer Trockenheit weitere Präzisierungen des

Modells notwendig sind. So ist durch Einbeziehung des 'Zwischentrocknungseffektes' in die weitere Modellentwicklung eine Verbesserung der Aussagegenauigkeit zu erwarten.

Neben den hier dargestellten Validierungsergebnissen wurden im Rahmen eines internationalen Modellvergleichs an unabhängigen Daten aus praxisnahen Untersuchungen gute Ergebnisse erzielt (FRANKO et al., 1995).

Das entwickelte Verfahren zur Anwendung eindimensionaler Modelle auf größere Territorien bietet gute Möglichkeiten zur Untersuchung von Agrarlandschaften. Es entspricht dem von WENKEL et al., (1994) geschilderten Vorgehen bei der Modellierung komplexer Landschaftsausschnitte. Als einschränkende Voraussetzung muß jedoch gefordert werden, daß Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Patches auszuschließen sind. Vor allem in dieser Richtung, jedoch auch im Hinblick auf eine Verbindung zur Modellierung des Grundwasserverhaltens sollten weitere Arbeiten anschließen.

Die Ergebnisse zum Vergleich eines aktuellen mit einem möglichen Klimaszenario der Zukunft zeigen für das untersuchte Gebiet auf der Querfurter Platte einen dramatischen Rückgang der Grundwasserneubildung. Die N-Austräge aus dem Agroökosystem sind in der Tendenz abnehmend. Durch eine zunehmende biologische Aktivität erfolgt ein verstärkter Abbau der umsetzbaren organischen Substanz, der sich in einem Anstieg des  $N_{\min}$ -Vorrates niederschlägt. Diese ersten Ergebnisse deuten die Richtung und das Ausmaß möglicher Veränderungen an, bedürfen jedoch dringend weiterer Bestätigung auf der Basis präzisierter lokaler Klimaszenarien. Die hier erarbeiteten Grundlagen bieten einen erfolgversprechenden Ausgangspunkt, um die Sensitivität ökologisch relevanter Zustandsgrößen auf Klimaveränderungen unter verschiedenen Standortbedingungen und Bewirtschaftungssystemen zu analysieren. Dabei muß vor allem die Kopplung des Bodenmodells an leistungsfähige Modelle der Pflanzenentwicklung und Biomasseproduktion sowie an Modelle zur Beschreibung der Schadstoffdynamik im Vordergrund stehen. Erste Ergebnisse wurden bereits durch Kopplung des CANDY-Bodenmoduls mit einem Winterweizen-Modell (CLAUS et al., 1992) erzielt. Aktuelle Arbeiten auf diesem Gebiet fließen in das BMFT-Verbundprojekt „Stabilität und Belastbarkeit von agrarischen Ökosystemen homogener Areale“ (Agro-Ökosystemforschung Quedlinburg) ein.

## 7. Zusammenfassung

Untersuchungen zur Auswirkung möglicher Klimaveränderungen sind erforderlich, um negative Folgen für die Gesellschaft und die Umwelt rechtzeitig zu erkennen und nach geeigneten Gegenmaßnahmen suchen zu können. Schwerpunkt dieses Projektes war die Entwicklung eines Bodenmodells, das die Prozesse des C- und N-Kreislaufs sowie der Temperatur- und Wasserdynamik in landwirtschaftlich genutzten Gebieten beschreiben kann. Die Zielstellung erfordert ein Langzeitmodell mit ausreichend genauer Abbildung kurzfristiger Effekte, das auch auf extreme Änderungen der Bewirtschaftung reagiert und für größere Territorien leicht mit Parametern versorgt werden kann.

Das CANDY-Modell bot für diese Zielstellung günstige Voraussetzungen und wurde durch Submodelle zur Beschreibung der Veränderung bodenphysikalischer Parameter in Abhängigkeit vom C-Gehalt und durch Integration eines Wettergenerators erweitert. Die Validierung des Modellsystems auf dem Meßfeld Bad Lauchstädt sowie in weiteren Anwendungen ergab befriedigende Ergebnisse. Gleichzeitig wurden Ansätze zur künftigen Weiterentwicklung herausgearbeitet.

Die Integration des Simulationssystems in ein Geographisches Informationssystem gibt die Möglichkeit zur Analyse der Stoffdynamik in Agrarlandschaften. Bodenparameter werden in diesem Fall über die Unterlagen der Mittelmaßstäbigen Standortkartierung (MMK) bereitgestellt.

Um die Auswirkungen möglicher Klimaveränderungen abschätzen zu können, wurde ein Verfahren entwickelt, daß die Erzeugung von Wetterdaten auf der Basis globaler Klimamodelle ermöglicht. Erste Anwendungen der entwickelten Methoden auf ein lößbestimmtes Gebiet der Querfurter Platte deuten auf einen starken Rückgang der Grundwasserneubildung, eine Zunahme der Umsatzaktivität und eine darauf zurückzuführende Abnahme des Humusvorrates im Boden hin.

## 8. Summary

Investigations on the impact of possible changes in climate are necessary to recognize negative consequences for the society and the environment and to look for countermeasures. This project was focussed on the development of a soil model with the ability to describe processes of C and N cycle and temperature and water dynamics in rural areas. This objective requires a long-term model with sufficient representation of short term variations, with the ability to respond to extreme variations in management and with sufficient possibilities for parameter supply in case of larger areas.

The CANDY model meets this requirements to a high degree and was supplemented by submodels for the variation of soil physical properties in dependence on the carbon content and by the integration of a weather generator. The validation of the model system on the experimental field in Bad Lauchstädt and in additional applications gave satisfactory results. Questions for the further development became obvious at the same time.

The integration of the simulation system in a GIS provides opportunities to analyse the matter dynamics in rural landscapes. In this case soil parameters are extracted from soil survey data (Mittelmaßstäbige Standortkartierung, MMK).

In order to estimate the consequences of possible climatic changes, a procedure for the generation of weather data has been developed basing on the results of global climatic models. First results from this system of an area in the loess dominated region Querfurter Platte show a marked decrease in groundwater production, an increase in microbial turnover activity and consequently a decrease in soil organic matter.

## 9. Literatur

- ALTERMANN, M., SCHRÖDER, H. (1992): Zur Kennzeichnung der Schwarzerden aus Löß in Sachsen-Anhalt. Kühn-Archiv, 86, Hamburg und Berlin, S.9-20
- AUTORENKOLLEKTIV, (1990): Ergebnisdokumentation zum Forschungs- und Entwicklungsbericht Nr. 003. AdL der DDR, FZB Bad Lauchstädt
- AUTORENKOLLEKTIV, (1991): Modellierung der C- und N-Dynamik in Ackerböden. Interner Bericht. FZB Bad Lauchstädt
- BUIHAND, T.A., (1978): Some remarks on the use of daily rainfall models. Journal of Hydrology, 36, S.295-308
- BURNS, I.G. (1974): A model for predicting the redistribution of salts applied to fallow soil after excess rainfall or evaporation. Journal. of Soil Science, 25, Oxford, S. 165-174
- BUS, E., (1985): Einfluß unterschiedlicher organischer Dünger auf Ertrag und ausgewählte Bodeneigenschaften, untersucht in einem Dauerdüngungsversuch auf Lößschwarzerde. Dissertation, AdL der DDR, Berlin
- CLAUS, S., WERNECKE, P., MÜHLE, H., (1992): Ontogenese und Vernalisation von Winterweizen (Experimente und dynamisches Modell). In: Möller, D. P. F., & Richter, O. (ed.): Fortschritte der Simulation in Medizin, Biologie und Ökologie. 5.Ebernburger Gespräch, Proceedings. Clausthal-Zellerfeld, S. 153 - 162
- FAUSTZAHLEN FÜR LANDWIRTSCHAFT UND GARTENBAU (1993):Verlagsunion Agrar. Münster
- FRANKO, U., (1989): C- und N-Dynamik beim Umsatz organischer Substanzen im Boden. Diss. B, AdL der DDR, Berlin
- FRANKO, U. (1990): C- und N-Dynamik beim Umsatz organischer Substanzen im Boden. Tagungsbericht AdL der DDR, 295, Berlin, S. 13-26
- FRANKO, U., PFEFFERKORN, A., ZEIBLER, A., OELSCHLÄGEL, B. (1991): Computersimulation als Hilfsmittel für eine umweltgerechte Landwirtschaft. Feldwirtschaft, 32, S. 559-561
- FRANKO, U. RÜHLEMANN, J. (1991): Simulation der C- und N-Dynamik eines gemüsebaulich genutzten Sandbodens. Gartenbauwissenschaften, 56/4, S. 174-179
- FRANKO, U. ; OELSCHLÄGEL, B. (1993): CANDY. -In: Simulationsmodelle zur Stickstoffdynamik. Schriftenreihe Agrarinformatik, 25, Stuttgart. S.99-110
- FRANKO, U.; OELSCHLÄGEL, B.; SCHENK, S. (1995): Simulation of Temperature-, Water- and Nitrogen dynamics using the Model CANDY. Ecological Modelling, Elsevier Verlag, Amsterdam

- FREYTAG, H.E.; LÜTTICH, M. (1985): Zum Einfluß der Bodenfeuchte auf die Bodenatmung unter Einbeziehung der Trockenraumdichte. Arch. Acker- Pflanzenbau Bodenk., Berlin, 29, S. 485-492
- GIORGI, F.; MEARNS, O., (1991): Approaches to the simulation of regional climate change: a review. Reviews of Geophysics, Vol. 29, S. 191-216
- GLUGLA, G., (1969): Berechnungsverfahren zur Ermittlung des aktuellen Wassergehaltes und Gravitationswasserabflusses im Boden. A.-Thaer-Archiv, Berlin, 13, S. 371-376
- GÖRLITZ, H., EBERT, K., ZIMMERMANN, K.-H., ASMUS, F., SCHMERLER, H. (1991): Anfall von organischen Düngern und Düngestoffen in der Tierhaltung. Feldwirtschaft, 32, Berlin. S. 468-470
- GRASSL, H., (1991): Anthropogene Einflüsse in der Geo- und Biosphäre. Die Geowissenschaften, 9, S. 272-275
- GYALISTRAS, D., V. STORCH, H., FISCHLIN, A., BENISTON, M., (1994): Linking GCM-simulated climatic changes to ecosystem models: case studies of statistical downscaling in the Alps. Climate Research, 4, S.167-189
- HARTUNG, J., (1991): Statistik. Oldenbourg Verlag, München
- HASSELMANN, K., (1990): Ocean Circulation and Climate Change. Report No. 58, MPI für Meteorologie, Hamburg
- HENLEY, S., (1981): Nonparametric Geostatistics. Applied Science Publishers, London
- HESSE, W. (1966): Grundlagen der Meteorologie für Landwirtschaft, Gartenbau und Forstwirtschaft. Geest & Portig, Leipzig
- JACOB, C., (1992): Methodische Untersuchungen zur Regionalisierung der Ergebnisse Globaler Zirkulationsmodellrechnungen mit Hilfe statistischer Verfahren. Spezialarbeiten aus der AG Klimaforschung des Meteorologischen Instituts der HU Berlin
- JENKINSON, D.; ADAMS, D. E., WILD, A., (1991): Model estimates of CO<sub>2</sub> emissions from soil response to global warming. Nature, 351, S. 304 - 306
- KARTSCHALL, T. (1986): Simulationsmodell der Bodenstickstoffdynamik. Dissertation A. AdL Berlin
- KINDLER, R. (1992): Ertragsschätzung in den neuen Bundesländern. Verlag Pflug und Feder. St. Augustin
- KOITZSCH, R., (1977): Schätzung der Bodenfeuchte aus meteorologischen Daten, Boden- und Pflanzenparametern mit einem Mehrschichtmodell. Zeitschrift für Meteorologie, 27, S. 302-306

- KOITZSCH, R., (1990): Bodenfeuchte- und Verdunstungsmodell BOWA. Interner Bericht. FZ Müncheberg, Müncheberg
- KOITZSCH, R.; GÜNTHER, R., (1990): Modell zur ganzjährigen Simulation der Verdunstung und der Bodenfeuchte landwirtschaftlicher Nutzflächen mit und ohne Bewuchs. Arch. Acker-Pflanzenbau Bodenkd., 34, S. 803-810
- KOITZSCH, R.; HELING, R.; VETTERLEIN, E., (1980): Simulation des Bodenfeuchteverlaufes unter Berücksichtigung der Wasserbewegung und des Wasserentzuges durch Pflanzenbestände. Arch. Acker- Pflanzenbau Bodenkd., 24, S.717-725
- KOITZSCH, R.; KLANK, I. (1990): Zur Schätzung von Tagessummen der Globalstrahlung aus der täglichen Sonnenscheindauer. Zeitschrift für Meteorologie, 40, S. 209-210
- KÖRSCHENS, M. (1980): Die Abhängigkeit der organischen Bodensubstanz von Standortfaktoren und acker- und pflanzenbaulichen Maßnahmen, ihre Beziehungen zu Bodeneigenschaften und Ertrag sowie Ableitung von ersten Bodenfruchtbarkeitskennziffern für den Gehalt des Bodens an organischer Substanz. Dissertation B. AdL, FZB Müncheberg B. Bad Lauchstädt
- KÖRSCHENS, M. (1988): Einfluß stark differenzierter  $C_t$ - und  $N_t$ - Gehalte auf bodenphysikalische Eigenschaften. -In: Tag.Ber. d. AdL der DDR.-269, Berlin. S.185-191
- KÖRSCHENS, M., STEGEMANN, K., PFEFFERKORN, A., WEISE, M., MÜLLER, A. (1994): Der Statische Düngungsversuch Bad Lauchstädt nach 90 Jahren. Teubner, Leipzig
- KUNDLER, P. (1989): Erhöhung der Bodenfruchtbarkeit. Deutscher Landwirtschaftsverlag Berlin, S.67-96
- LIEBEROTH, I. (1982): Bodenkunde. Deutscher Landwirtschaftsverlag Berlin, S.140 ff.
- MCVOY, C.W.; KERSEBAUM, K.C.; ARNING, M.; KLEEBOG, P.; OTHMER, H.; SCHRÖDER, U. (1995): A data set from north Germany for the validation of agroecosystem models. Ecological Modelling, Elsevier Verlag, Amsterdam
- MORGENSTERN, H. (1990): Aus Standortunterlagen ableitbare Substratverhältnisse der Böden der DDR als eine Grundlage für die Bestimmung des Feinanteils der Ackerkrume und des krumennahen Unterbodens.- In: Arch.Acker- Pflanzenbau Bodenkd.- Berlin, 34, S.232-242
- NOLTE, C. , WERNER, W. (1991): Stickstoff- und Phosphateintrag über diffuse Quellen in Fließgewässer des Elbeinzugsgebietes im Bereich der ehemaligen DDR. Schriftenreihe Agrarspectrum ,19, Frankfurt
- OELSCHLÄGEL, B. (1992): Zur Anwendung eines Wettergenerators bei der Modellierung von Bodenprozessen. In: Tag.Ber. zum Symposium Dauerfeldversuche und Nährstoffdynamik. Leipzig, S.131-140

- PATANKAR, S. V., (1976): Numerical Heat Transfer and Fluid Flow. Mc Graw Hill
- PETELKAU, H. (1993). In: Kundler, P. (1989): Erhöhung der Bodenfruchtbarkeit. Deutscher Landwirtschaftsverlag Berlin
- PFEFFERKORN, A. (1990): Einfluß extrem hoher Ct- und Nt-Gehalte im Boden auf N-Entzug, N-Verlagerung und Bodeneigenschaften. Diss. A .Halle
- PIEHLER, H., (1990): Modellkonzept zur Gefährdungsabschätzung der Trinkwassergewinnung in Wasserschutzgebieten durch Nitrat. Schriftenreihe Angewandte Systemforschung ,2, Universität Osnabrück
- RACSKO, P.; SZEIDL, L.; SEMENOV, M.A., (1991): A serial approach to local stochastic weather models. Ecological Modelling, Elsevier Verlag, Amsterdam, .57, S 27-41
- REICH, T., (1985): Zur Andauer von Niederschlags- und Trockenperioden. Zeitschrift für Meteorologie, 35, N. 4
- RICHARDSON, C.W., (1981): Stochastic Simulation of Daily Precipitation, Temperature, and Solar Radiation. Water Resources Research, Vol.17, S.182-190
- RICHARDSON, C.W.; NICKS, A.D., (1990): Weather Generator Description. In: A.N. Sharpley; J.R. Williams, (Editor), (1990). EPIC. The Erosion- Productivity Impact Calculator. 1. Model description. United States Department of Agriculture, Agricultural Research Service, Technical Bulletin no. 1768, Washington, S. 93-104
- RICHARDSON, C.W.; NICKS, A.D., (1991): Weather Generator Description. In: A.N. Sharpley; J.R. Williams (Ed.). EPIC. The Erosion-Productivity Impact Calculator. 1. Model description. USDA, Agricultural Research Service Washington, Technical Bulletin no. 1768, S. 93-104
- RIPLEY, B.D., (1988): Statistical Inference for Spatial Processes. Cambridge University Press, Cambridge
- RITCHIE, J.T., D.C. GODWIN AND S. OTTER-NACKE (1986): CERES-Wheat: A simulation model of wheat growth and development, CERES-Modellbeschreibung
- ROECKNER, E, ARPE, K., BENGTTSSON, L., et al., (1992): Simulation of the Present-Day Climate with the ECHAM Model: Impact of Model Physics and Resolution. Report No. 93, MPI für Meteorologie, Hamburg
- SCHWARZ, H.R., (1988): Numerische Mathematik. Teubner, Stuttgart
- SEMENOV, M.A.; PORTER, J.R., (1995): Climatic variability and the modelling of crop yields. Agricultural and Forest Meteorology, 73
- SMITH, R.E.; SCHREIBER, H.A., (1974): Point Processes of Seasonal Thunderstorm Rainfall. 2. Rainfall Depth Probabilities. Water Resources Research, Vol. 10, S. 418-423

- STERN, R.D.; COE, R., (1984): A model fitting analysis of daily rainfall data. Journal of the Royal Statistical Association A, 147, S.1-34
- STILLER, A., (1992): Zufälligkeiten. Turbo-Pascals Zufallszahlengenerator. Zeitschrift für Computertechnik c't, Heft 5, S. 173
- STORCH, H. V.; ZORITA, E., CUBASCH, U., (1992): Downscaling of Global Climate Change Estimates to Regional scales: An Application to Iberian Rainfall in Wintertime. Report No. 64 , MPI für Meteorologie, Hamburg
- STROHBACH, B. UND SCHMIDT, R. (1982): Zur Gliederung der Lößstandorte im Rahmen der Mittelmaßstäbigen Landwirtschaftlichen Standortkartierung der DDR.- In: Arch. Acker- Pflanzenbau Bodenkd.- Berlin, 26, S. 279
- SUCKOW, F., (1986): Ein Modell zur Berechnung der Bodentemperatur unter Brache und unter Pflanzenbestand. Dissertation A, AdL der DDR, Berlin
- VETTERLEIN, E. (1989):. Bodenphysikalische Kennwerte für Substrat-Horizont-Gruppen. In:Koepeke, V., Bodenwasserregulierung, AdL der DDR. Müncheberg, S.116 ff.
- VETTERLEIN, E. ;EBERT, J.(1989): Beziehungen zwischen Tongehalt und Feinanteil in Böden aus Löß und Sandlöß.-In: Arch.Acker- Pflanzenbau Bodenkd.- Berlin, 33, S.279-287
- WENKEL, K.-O., SCHULTZ, A., LUTZE, G., (1994): Landschaftsmodellierung - eine neue Richtung in der Agrarlandschaftsforschung. In: Landschaftsmodellierung, ZALF-Berichte, 13, Müncheberg, S. 8 - 16
- WILKS, D.S., (1992): Adapting stochastic weather generation algorithms for climate change studies. Climatic Change, 27, S. 67-84
- WILLMOTT, C.J.; ROWE, C.M.; PHILPOT, W.D., (1985): Small-Scale Climate Maps: A Sensitivity Analysis of Some Common Assumptions Associated with Grid-Point Interpolation and Contouring. The American Cartographer, Vol.12 Nr.1, S. 5-16

**Technische Bearbeitung:**

Petra Petersohn

**Kontaktadresse:**

UFZ-Umweltforschungszentrum Leipzig-Halle GmbH

Sektion Bodenforschung

Dr. Uwe Franko

Hallesche Straße 44

D-06246 Bad Lauchstädt

Telefon 034635/73-222

Telefax 034635/73-288

e-mail [ufranko@bdf.ufz.de](mailto:ufranko@bdf.ufz.de)