

Thema



**Modellierung des Kohlenstoffhaushaltes in Ackerböden auf der
Grundlage bodenstrukturabhängiger Umsatzprozesse**

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

Dr. rer. nat.

vorgelegt der

Mathematisch–Naturwissenschaftlichen-Technischen Fakultät
(mathematisch-naturwissenschaftlicher Bereich)
der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg

von

Katrin Kuka

geb. am: 02.06.1973 in: Halle/Saale

Gutachter:

1. Prof. Dr. Manfred Frühauf, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg
2. Prof. Dr. Jörg Bachmann, Universität Hannover

Die Verteidigung der Dissertation erfolgte am 17.11.2005.

urn:nbn:de:gbv:3-000010027

[<http://nbn-resolving.de/urn/resolver.pl?urn=nbn%3Ade%3Agbv%3A3-000010027>]

INHALTSVERZEICHNIS

Inhaltsverzeichnis.....	I
Abbildungsverzeichnis.....	III
Tabellenverzeichnis.....	VI
Symbolverzeichnis.....	VIII
0 Vorwort	1
1 Einleitung	2
1.1 Problemstellung.....	2
1.2 Zielsetzung	4
1.3 Lösungsweg.....	4
2 Grundlagen	6
2.1 Kohlenstoffkreislauf.....	6
2.2 Bodengefüge und -wasser	8
2.3 Bodenprozessmodell CANDY	10
3 Material und Methoden	17
3.1 Inkubationsexperimente	17
3.1.1 Inkubationsexperiment mit gelöster organischer Substanz.....	17
3.1.2 Inkubationsexperiment mit ¹⁴ C-markiertem Weizenstroh	17
3.2 Charakterisierung der Versuchsstandorte.....	18
3.2.1 „Statischer Düngungsversuch“ Bad Lauchstädt.....	20
3.2.2 „Ewiger Roggenbau“ Halle.....	22
3.2.3 „Prag-Ruzyně Feld B“ Prag	24
3.2.4 „Grakov Versuchsfeld“ Grakov	26
3.2.5 „Dauerfeldversuch zur Untersuchung der organischen Substanz“ Keszthely	27
3.3 Bodenphysikalische Untersuchungen	29
3.3.1 Scannermessungen	29
3.3.2 Bestimmung der Trockenrohddichte.....	30
3.3.3 Bestimmung des Eindringwiderstandes	32
3.4 C-Input Berechnungen	33

4	Modellentwicklung von CIPS.....	35
4.1	Poolkonzept.....	35
4.2	Modelstruktur.....	36
4.3	Initialisierung des Modells.....	39
4.4	Parametrisierung von CIPS.....	40
5	Modellvalidierung.....	53
5.1	Präprozessing.....	55
5.2	Simulationsergebnisse „Statischer Dauerdüngungsversuch“ in Bad Lauchstädt.....	57
5.3	Simulationsergebnisse „Ewiger Roggenbau“ in Halle.....	59
5.4	Simulationsergebnisse „Versuchsfeld B“ in Prag-Ruzyně.....	61
5.5	Simulationsergebnisse „Grakov Versuchsfeld“ in Grakov.....	63
5.6	Simulationsergebnisse „Dauerfeldversuch zur Untersuchung der organischen Substanz“ in Keszthely.....	65
6	Dichtedynamik.....	67
6.1	Dichtebestimmung mittels Stechzylindern.....	67
6.2	Dichtebestimmung aus Höhendifferenzen und deren Verteilung im A _p -Horizont ..	71
6.2.1	Dichtebestimmung aus Höhendifferenzen.....	72
6.2.2	Verteilung der Trockenrohdichte aus Höhendifferenzen im Bodenprofil	79
6.3	Sensitivität der Dichte auf das Umsatzverhalten der organischen Substanz.....	84
7	Diskussion.....	89
8	Ausblick.....	99
9	Zusammenfassung.....	100
10	Literatur.....	102
	Danksagung.....	110

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abb. 2.1: Der globale Kohlenstoffkreislauf (UNEP, 2003).....	6
Abb. 2.2: Schema des Kohlenstoffkreislaufs im Ackerbausystem	7
Abb. 2.3: Aufbau des CANDY-Modells (FRANKO, 1995 b).....	10
Abb. 3.1: Durchschnittliche Jahrestemperaturen und Niederschläge der Versuchsstandorte..	18
Abb. 3.2: Textur der Dauerversuchsböden (* Texturumrechnung von russ. in dt. System s. Anhang C)	19
Abb. 3.3: Mittlere Temperaturen und Niederschlagsverteilung am Standort Bad Lauchstädt (1956-2003, Klimastation Bad Lauchstädt)	20
Abb. 3.4: Mittlere Temperaturen und Niederschlagsverteilung am Standort Halle (1951-2001, Klimastationen Halle-Zöberitz und Halle-Kröllwitz)	23
Abb. 3.5: Mittlere Temperaturen und Niederschlagsverteilung am Standort Prag (1961-2002, Klimastation Prag).....	25
Abb. 3.6: Mittlere Temperaturen und Niederschlagsverteilung am Standort Grakov (1967- 1999, Klimastation Grakov).....	26
Abb. 3.7: Mittlere Temperaturen und Niederschlagsverteilung am Standort Keszthely (1961- 2003, Klimastation Keszthely).....	27
Abb. 3.8: Versuchsaufbau der Scannermessung	29
Abb. 4.1: Modellstruktur von CIPS	36
Abb. 4.2: Umsatz der organischen Substanz in einer Pore (Bezeichnungen s. Tabelle 4.2) ...	37
Abb. 4.3: DOM-Versuchsmodell	41
Abb. 4.6: ^{14}C -DOM-Dynamik beim Abbau von markiertem Weizenstroh im Boden der Volldüngungsparzelle des „Statischen Düngungsversuches“ Bad Lauchstädt	45
Abb. 4.7: Scatterplot zwischen gemessenen (DOM-Mess) und simulierten (DOM-Sim) ^{14}C -DOM Werten	45
Abb. 4.8: ^{14}C -Biomasse-Dynamik beim Abbau von markiertem Weizenstroh im Boden der Volldüngungsparzelle des „Statischen Düngungsversuches“ Bad Lauchstädt	46
Abb. 4.9: Scatterplot zwischen gemessenen (Bio-Mess) und simulierten (Bio-Sim) ^{14}C -Biomasse Werten.....	46
Abb. 4.10: ^{14}C - CO_2 -Dynamik beim Abbau von markiertem Weizenstroh im Boden der Volldüngungsparzelle des „Statischen Düngungsversuches“ Bad Lauchstädt	47
Abb. 4.11: Scatterplot zwischen gemessenen (CO_2 -Mess) und simulierten (CO_2 -Sim) ^{14}C - CO_2 -Werten	47

Abb. 4.12: Simulationsergebnis des Schwarzbracheversuches (SB) Bad Lauchstädt nach Parameteroptimierung von k_{ROM} von $0,0012 \text{ d}^{-1}$ auf $0,0011 \text{ d}^{-1}$	51
Abb. 4.13: Simulationsergebnisse nach Einführung unterschiedlicher η_L und η_R für Anbaufrucht und Organische Dünger	51
Abb. 5.1: Schema zur Anwendung des CIPS-Modells	53
Abb. 5.2: BAT-Dynamik und Verteilung auf die Porenklassen im „Statischen Dauerdüngungsversuch“ Bad Lauchstädt	57
Abb. 5.3: Simulationsergebnisse der Kontroll- und Volldüngungspartzeile (STM300+NPK) des „Statischen Dauerdüngungsversuch“ Bad Lauchstädt.....	58
Abb. 5.4: BAT-Dynamik und Verteilung auf die Porenklassen im „Ewigen Roggenbau“ Halle	59
Abb. 5.5: Simulationsergebnisse der Kontroll- und Stallmistpartzeile (STM) des „Ewigen Roggenbaus“ Halle.....	60
Abb. 5.6: BAT-Dynamik und Verteilung auf die Porenklassen im „Prag-Ruzyně Feld B“ Prag	61
Abb. 5.7: Simulation der Volldüngungs- (STM+NPK) und Kontrollvariante des „Prag- Ruzyně Feldes B“ Prag	62
Abb. 5.8: BAT-Dynamik und Verteilung auf die Porenklassen im „Grakov Versuchsfeld“ Grakov.....	63
Abb. 5.9: Simulation der Kontrollvariante des „Grakov Versuchsfeld“ Grakov.....	64
Abb. 5.10: BAT-Dynamik und Verteilung auf die Porenklassen im „Dauerfeldversuch zur Untersuchung der organischen Substanz“ Keszthely.....	66
Abb. 5.11: Simulation der Stallmist- (STM) und Kontrollvariante in im „Dauerfeldversuch zur Untersuchung der organischen Substanz“ Keszthely.....	66
Abb. 6.1: Methode zur Bestimmung der TRD_{HD} und Verteilung im Bodenprofil mittels Eindringwiderstandsmessungen.....	72
Abb. 6.2: Prozentuale Häufigkeiten der TRD_{HD} -Klassen an den verschiedenen Messterminen	76
Abb. 6.3: Graphische Darstellung der Verteilungstatistik der TRD_{HD}	77
Abb. 6.4: Eindringwiderstandsmessungen dargestellt mit angepasster Tiefe nach Tabelle 6.7	79
Abb. 6.5: Angenommener linearer Zusammenhang zwischen TRD_{HD} und R_E	80
Abb. 6.6: Verteilung der mittleren TRD_{HD} im Bodenprofil mittels R_E	82
Abb. 6.7: Gegenüberstellung der TRD_{HD} -Verteilung im Bodenprofil mit der Verteilung der TRD_{StZ} nach linearer Regression	83

Abb. 6.8: Gegenüberstellung der TRD_{HD} -Verteilung im Bodenprofil mit der Verteilung der TRD_{StZ} nach exponentieller Regression.....	83
Abb. 6.9: Änderung des Gesamtkohlenstoffgehaltes im Volldüngungsplot des „Statischen Düngungsversuches“ Bad Lauchstädt nach 100 a bei Annahme unterschiedlicher TRD bei einem Anfangskohlenstoffgehalt von 1,8%	88
Abb. 7.1: Langzeitsimulationen vom “Statischen Dauerdüngungsversuch” Bad Lauchstädt .	95
Abb. 7.2: Langzeitsimulationen vom „Ewigen Roggenbau“ Halle	95
Abb. 7.3: Langzeitsimulationen vom „Versuchsfeld B“ Prag	96
Abb. 7.4: Langzeitsimulationen vom „Grakov Versuchsfeld” Grakov	96
Abb. 7.5: Langzeitsimulationen vom „Dauerfeldversuch zur Untersuchung der organischen Substanz“ Keszthely.....	97

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 2.1: Landnutzung und Maßnahmen, welche das Gleichgewicht des Kohlenstoffhaushaltes im Boden beeinflussen (nach NIEDER et al., 2003)	8
Tabelle 2.2: Einteilung der Porengrößenbereiche nach dem Porendurchmesser und der Wasserspannung (SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL, 1992)	8
Tabelle 2.3: Benötigte Wetterdaten für CANDY-Simulationen	15
Tabelle 2.4: Benötigte Bodenkennwerte für CANDY-Simulationen.....	15
Tabelle 2.5: Benötigte Bewirtschaftungsdaten für CANDY-Simulationen	16
Tabelle 3.1: Auflistung der Untersuchungsstandorte für Modellanwendung	18
Tabelle 3.2: Ausgewählte Standorteigenschaften in Bad Lauchstädt	21
Tabelle 3.3: Rekonstruierte Aufgang- und Erntetermine vom „Statischen Düngungsversuch“ Bad Lauchstädt.....	22
Tabelle 3.4: Ausgewählte Standorteigenschaften in Halle (SCHLIEPHAKE et al., 2000).....	23
Tabelle 3.5: Termine für fehlende Managementdaten	24
Tabelle 3.6: Ausgewählte Standorteigenschaften in Prag (KUBAT et al., 2003)	25
Tabelle 3.7: Ausgewählte Standorteigenschaften in Grakov (GUREVICH und BORONIN, 1969)	27
Tabelle 3.8: Ausgewählte Standorteigenschaften von Keszthely (NEMETH, 1982).....	28
Tabelle 3.9: Messtermine der bodenphysikalischen Untersuchungen mit Zuordnung zu Managementterminen des „Statischen Düngungsversuches“ Bad Lauchstädt Schlaghälfte 1 Parzelle STM+NPK.....	30
Tabelle 3.10: Fruchtartenparameter zur ertragsabhängigen Berechnung des Kohlenstoffinputs	33
Tabelle 3.11: Parameter zur Berechnung des Kohlenstoffinputs organischer Dünger	34
Tabelle 4.1: Pools des CIPS-Modells.....	35
Tabelle 4.2: Modellparameter	38
Tabelle 4.3: Startparameter	41
Tabelle 4.4: BAT-Verteilung für Stroh-Inkubationsexperiment.....	44
Tabelle 4.5: Parameterwerte von CIPS nach erster Parametrisierung	48
Tabelle 4.6: Sensitivitätsanalyse der Modellparameter – Berechnung als prozentuale Abweichung vom Gesamtkohlenstoffgehalt nach 100 a Simulation des Kontrollplots des „Statischen Düngungsversuches“ Bad Lauchstädt gegenüber der Simulation mit Originalparametersatz (s. Tabelle 4.5)	49

Tabelle 4.7: Parameterwerte von CIPS	52
Tabelle 5.1: Vorgehensweise zur Modellanwendung von CIPS.....	54
Tabelle 5.2: Kalkulation der BAT und Verteilung auf die Mikro- (mic), Meso- (mes) und Makroporen (mac) mit dem CANDY-Modell nach Kap. 2.3	55
Tabelle 5.3: Berechnung der porenoberflächenabhängigen C-Verteilung zu Simulationsbeginn	56
Tabelle 5.4: C-Input aus Ernte- und Wurzelrückständen (EWR) und Stallmist (STM)	56
Tabelle 6.1: Die Messergebnisse der Trockenrohddichte mit Stechzylindern (TRD_{StZ})	68
Tabelle 6.2: Mittlere TRD_{StZ} berechnet mit linearem Ansatz nach Gleichung (6.1) mit den Koeffizienten p_1 und p_2	69
Tabelle 6.3: Mittlere TRD_{StZ} berechnet mit exponentialem Ansatz nach Gleichung (6.4) mit den Koeffizienten a, b und c.....	70
Tabelle 6.4: Die aus der Änderung der TRD_{StZ} (s. Tabelle 6.2 und Tabelle 6.3) ermittelten Schichtdicken	71
Tabelle 6.5: Maximal auftretende Höhendifferenzen (Δh) bei der Rastersubtraktion.....	74
Tabelle 6.6: Datentabelle der prozentualen Häufigkeiten der TRD_{HD} -Klassen.....	76
Tabelle 6.7: Aus Scannermessungen ermittelte mittlere Schichtdicken und TRD_{HD} mit der zugehörigen Standardabweichung.....	77
Tabelle 6.8: Alle TRD im Vergleich.....	78
Tabelle 6.9: Alle mittlere Schichtdicken im Vergleich.....	78
Tabelle 6.10: Nach Gleichung (6.4) berechnete TRD_{StZ} zwischen 0-5 cm	82
Tabelle 6.11: Texturklassenumrechnung vom deutschen in das USDA7 System für den Boden des „Statischen Dauerdüngungsversuches“ Bad Lauchstädt	85
Tabelle 6.12: Mittels Pedotransferfunktionen ermittelte PWP, FK und Porenvolumina (PV) bei experimentell bestimmter unterschiedlicher Trockenrohddichte (TRD_{HD}).....	86
Tabelle 6.13: Verteilung des Gesamtkohlenstoffs zu Simulationsbeginn ($C_{org}=1,8\%$) auf die Mikro- (mic), Meso- (mes) und Makroporen (mac) nach der Porenoberfläche..	86
Tabelle 6.14: Verteilung der mit dem CANDY-Modell simulierten BAT_{glob} auf die Mikro- (mic), Meso- (mes) und Makroporen (mac).....	87
Tabelle 7.1: Vergleich der Verteilung des C_{org} -Gehaltes auf die Porenklassen zwischen Simulation mit dem CIPS-Modell und Berechnung mit dem POF-Programm Beispiel des „Statischen Dauerdüngungsversuches“ Bad Lauchstädt	93

SYMBOLVERZEICHNIS

Symbol	Bedeutung
A	Oberfläche einer Porenraumklasse
A _{ha}	Fläche mit einer Größe von einem Hektar
A _{n,i}	Oberfläche einer Porenraumklasse
AOM	Aktive organische Substanz (Active Organic Matter)
AT	Abschlämbbare Teilchen (Ton+Fein-+Mittelschluff; Partikel ≤ 20 µm)
BAT	Biologisch aktive Zeit (Biological Active Time)
BAT _{glob}	globale BAT
BAT _{mac}	BAT in Makroporen
BAT _{mes}	BAT in Mesoporen
BAT _{mic}	BAT in Mikroporen
BM	Kohlenstoff in mikrobieller Biomasse
BT	Bodentemperatur
C	Kohlenstoff (Carbon)
C _{FOM}	Kohlenstoffinput in den Boden - Frische organische Substanz
C/N	Kohlenstoff- und Stickstoffverhältnis
C _{EWR}	Kohlenstoffmenge der EWR
C _i	inertter Kohlenstoff
CO ₂	Kohlendioxid
C _{OD}	Kohlenstoffmenge organischer Dünger
C _{org_ges}	Gesamtkohlenstoffgehalt (Simulationsbeginn)
C _{org_n}	C _{org} -Gehalt in einer Porenraumklasse
DOM	Gelöste organische Substanz (Dissolved Organic Matter)
Ertrag _{ha}	Ertrag pro Hektar
EWR	Ernte- und Wurzelrückstände
FAT	Feinanteil (Ton+Feinschluff; Partikel ≤ 6,3µm)
F _{EWR}	Faktor zur Kalkulation des ertragsabhängigen Anteils von C _{EWR}
FK	Feldkapazität
FM _{OD}	Frischmasse der organischen Dünger

FOM	FrISChe organISChe SubStanz (Fresh Organic Matter)
FOM _L	Labiler Anteil an FOM (Labile FOM)
FOM _R	Stabiler Anteil an FOM (Resistant FOM)
FOM _S	Lösliche Anteil an FOM (Soluble FOM)
G _{Bf}	Bruttofrischgewicht - Einwaage frISChe Stechzylinderprobe [g]
G _{Btro}	Bruttotrockengewicht - Einwaage trockene Stechzylinderprobe [g]
G _f	Nettogewicht des naturfeuchten Bodens
G _{St}	Einwaage Stechzylinder [g]
G _{TM}	Kohlenstoffgehalt der Trockenmasse
G _{tro}	Nettogewicht des trockenen Bodens [g]
GW	Gravitationswasser
h	Bodentiefe
HD	Höhendifferenz
<i>k</i>	Reaktionsgeschwindigkeitskonstante
k _{EW}	ertragsunabhängige Konstante
mac	Makroporen (Macro pores)
m _{Boden}	Bodenmasse
mes	Mesoporen (Meso pores)
mic	Mikroporen (Micro pores)
N	Stickstoff (Nitrogen)
nFK	nutzbare Feldkapazität
NPK	Stickstoff, Phosphor, Kalium
pF	Wasserspannung
POF	Porenoberfläche
PV	Porenvolumen
PWP	Permanenter Welkepunkt
Q	VANT'T HOFF-Konstante
R	Äquivalentporenradius
R _A	Einfluss der Durchlüftung (engl. aeration)
R _{BF}	Einfluss der Bodenfeuchte

R_E	Eindringwiderstand
ROM	Refraktäre organische Substanz (Refractory Organic Matter)
SOM	Organische Bodensubstanz (Soil Organic Matter)
STM	Stallmist
t	Zeit (time)
T	Ton
TKG	Texturklassengröße
TM	Trockenmasseanteil
TRD	Trockenrohddichte
TRD _{HD}	Trockenrohddichte aus Höhendifferenzen bestimmt
TRD _{ref}	TRD zu Versuchsbeginn [g/cm ³]
TRD _{StZ}	Trockenrohddichte mit Stechzylindern bestimmt
TSD	Trockensubstanzdichte
V	Volumen der Porenraumklasse
V _A	Luftvolumen der jeweils kleineren Porenklasse
V _{St}	Volumen des Stechzylinders [cm ³]
V _w	Wassersättigungsvolumen der jeweils kleineren Porenklasse
x	Partikelgrößendurchmesser der zu interpolieren ist (obere Grenze)
α	Dekompositionskoeffizient
Δh	Höhendifferenz [cm]
Δp	Parameteränderung
Δt	Zeitabschnitt der Standardzeit
ε_L	relatives Luftvolumen
ε_p	relatives „pocket“ Volumen (Konstante)
η	Synthesekoeffizient
Θ	Bodenfeuchte
σ	Standardabweichung
$\varphi(FAT)$	Texturindikator (abhängig vom FAT - Partikel $\leq 6,3\mu\text{m}$)