

7 Diskussion

Der wesentliche Erkenntniszuwachs in Hinblick auf die Umsetzbarkeit der im Boden befindlichen organischen Substanz durch SKJEMSTAD (2001), GLEIXNER et al. (2002) und BRODOWSKI et al. (2003) unterstützt die Modellvorstellung, dass man die gesamte organische Substanz in dem Umsatzzyklus berücksichtigen muss.

Bei den klassischen SOM-Modellen wie CANDY (FRANKO, 1989 und 1995b), DAISY (HANSEN et al., 1990 und 1991), CENTURY (METHRELL, 1993) und Roth-C (COLEMANN und JENKINSON, 1995) erfolgt die Aufteilung der organischen Substanz in konzeptionelle Pools, die sich durch verschieden schnelle Umsatzzeiten der organischen Substanz auszeichnen. Dabei wird zwischen labilen bzw. aktiven Pools, langsamen bzw. intermediären Pools und inerten bzw. passiven Pools unterschieden. Mit Hilfe der konzeptionellen Pools lässt sich die Dynamik des Kohlenstoffs im Boden gut abbilden. Die Messbarkeit der einzelnen Pools ist jedoch eingeschränkt, da die Aufteilung der organischen Substanz auf die einzelnen Pools nur aufgrund der Abbaubarkeit erfolgt. In der Realität sind verschiedene Stabilisierungsprozesse überlagert. Aufgrund dessen müssen bei Nichtberücksichtigung von verschiedenen Stabilisierungsmechanismen die Anteile von chemisch labilem Kohlenstoff zugunsten von chemisch stabilem Kohlenstoff verschoben werden, um dennoch die gemessene Dynamik des Kohlenstoffs abbilden zu können. Aus diesem Grund schließt sich die Messbarkeit einzelner Pools aus.

Im CIPS-Modell wird der Boden als Reaktor betrachtet, in dem Porenräume mit guten und schlechten Umsatzbedingungen existieren. Die gesamte organische Bodensubstanz wird als umsetzbar betrachtet, ist jedoch teilweise aufgrund ihrer Lokalisierung im Porenraum mit schlechten Umsatzbedingungen gegen mikrobiellen Abbau geschützt. Im Gegensatz zu anderen SOM-Modellen wird dadurch im CIPS-Modell kein inerter Kohlenstoffpool benötigt, um die Langzeitdynamik des Kohlenstoffs im Boden abbilden zu können.

Die Aufteilung der organischen Substanz erfolgte im CIPS-Modell aufgrund von möglichst messbaren Poolgrößen. Dabei wird zwischen dem Pool der frischen organischen Substanz (FOM), dem Pool der aktiven organischen Substanz als Äquivalent zur Biomasse (AOM), dem Pool der gelösten organischen Substanz (DOM) und dem Pool der refraktären

organischen Substanz (ROM) unterschieden (s. Kap. 4.1). Der FOM-Pool umfasst den Input an organischen Düngern sowie Ernte- und Wurzelrückständen. Dabei ist die Menge des Kohlenstoffs, der zur Reproduktion der organischen Bodensubstanz dient, eine sensible Größe, die den gesamten Kohlenstoffhaushalt dominiert. Bei dem für die Parametrisierung des CIPS-Modell verwendeten Laborexperiment mit ^{14}C -markierten Weizenstroh (s. Kap. 3.1.2) war die Bestimmung der FOM-Poolgröße einfach, da genaue Kenntnisse über die eingesetzte C-Menge vorlagen. Bei Freilandversuchen lässt sich die Poolgröße über die Quantifizierung der Wurzel- und Stoppelmengen und deren C-Gehalte bestimmen. Bei Einsatz von organischen Düngern benötigt man die eingesetzte Menge und dessen C-Gehalt. Für die verschiedenen Anbaufrüchte und organischen Dünger wurden dazu von FRANKO (1997) ertrags- bzw. düngermengenabhängige Berechnungsformeln für den FOM-Pool angegeben (s. Kap. 3.4), die auf der Grundlage von experimentellen Untersuchungen zum Umsetzungsverhalten der Ernterückstände und Wurzeln landwirtschaftlich genutzter Pflanzenarten von KLIMANEK (1990 a und b) beruhen. Der Nachteil dieser Berechnungsmöglichkeit ist, dass standörtliche Unterschiede, die bei gleichem Ertrag zu einem unterschiedlichen Spross- und Wurzelwachstum führen, nicht berücksichtigt werden. Eine experimentelle Bestimmung des FOM-Pools für alle Simulationsjahre ist jedoch ausgeschlossen. Daher muss mit Näherungsformeln gearbeitet werden, die auf standörtliche Gegebenheiten angepasst sind. Dazu müssen in Zukunft noch weitere Untersuchungen betrieben werden. Weiterer Forschungsbedarf besteht zudem bezüglich der Aufteilung des FOM-Pools in die löslichen, labilen und stabilen Anteile. Bei den durchgeführten Simulationsrechnungen wurde der lösliche Anteil bisher vernachlässigt. Die Aufteilung des FOM-Pools in den labilen und stabilen Anteil erfolge zu gleichen Teilen. Um fruchtarten- und düngerspezifische Aufteilungen vornehmen zu können, müssten Inkubationsexperimente durchgeführt werden, bei denen die Aufteilung der frischen organischen Substanz in die löslichen, labilen und stabilen Anteile und deren Abbaugeschwindigkeiten untersucht werden. Mit diesem Wissen könnte das CIPS-Modell hinsichtlich der ersten Abbauphase der organischen Substanz besser optimiert werden, bei der die Rekalzitranz nach KÖGEL-KNABNER (2002) die entscheidende Rolle spielt.

Der AOM-Pool ist als Äquivalent zur Biomasse mit der CFE-Methode nach VANCE et al. (1987) experimentell messbar. Bei dieser Methode wird sowohl die ruhende als auch aktive Biomasse bestimmt. Da im CIPS-Modell aufgrund der differenzierten Umsatzbedingungen in den Porenklassen nur ein Teil der Biomasse aktiv ist, bedarf es der Überprüfung, ob die Substrat-Induzierte-Methode (SIR) (ANDERSON und DOMSCH, 1978) sich eignet, um die

gerade am Stoffwechsel beteiligte Biomasse zu ermitteln. Dazu müsste ein Laborexperiment gestartet werden, bei dem die Biomassebestimmung mit der SIR-Methode im Boden bei verschiedenen eingestellten pF-Stufen erfolgt. Die Biomasse, die aufgrund der BAT-Berechnung jeweils in den Porenräumen aktiv ist, müsste dann mit der gemessenen Biomasse übereinstimmen, die mit der SIR-Methode ermittelt wurde.

Die Umsatzprozesse im AOM-Pool verlaufen nach einer Reaktion erster Ordnung. Da die Größe des AOM-Pools die bestimmende Größe für die Umsatzleistung sein kann, ist es überlegenswert, die substratkonzentrationsabhängige Michaelis-Menten-Kinetik anzuwenden. Voraussetzung dazu wäre eine genauere Kenntnis über die Effizienz der Biomasse.

Der DOM-Pool stellt eine Schlüsselfunktion im CIPS-Modell dar, da der Stoffaustausch zwischen den Porenklassen immer über diesen Pool erfolgt. DOM lässt sich als Summenparameter experimentell bestimmen, so dass die Gesamtpoolgröße ermittelt werden kann. Weiterer Forschungsbedarf besteht bezüglich der Aufklärung der Quellfunktion, der Umsetzung und Stabilisierung von DOM. Als Quelle von DOM werden bisher der Zerfall von Biomasse und der Input an organischer Substanz angesehen. Der Abbau des DOM-Pools erfolgt in Abhängigkeit der BAT-Verteilung im Porenraum über die Autolyse der Biomasse.

Ein Experiment, bei dem die DOM-Menge bei verschiedenen pF-Stufen bestimmt wird, könnte zum Detektieren von DOM im Porenraum dienen. Aufgrund der fehlenden Daten ist ein DOM-Leaching momentan nicht im CIPS-Modell berücksichtigt.

Im ROM-Pool ist alle organische Bodensubstanz zusammengefasst, die nicht dem FOM-, AOM- oder DOM-Pool zugeordnet werden kann. Dies erfolgt vor dem Hintergrund, dass Biomasse sowohl den aufgrund der Molekularstruktur als labil als auch den als stabil eingestuften Kohlenstoff umsetzen kann und somit eine weitere Untergliederung des ROM-Pools unlogisch erscheint. Es besteht der Vorteil, dass die Gesamtgröße des Pools über Differenzbildung des C_{org} -Gehaltes abzüglich der AOM- und DOM-Poolgröße bestimmt werden kann, wenn man FOM im Boden ausschließen kann.

Der Kohlenstoff wird auf die Reaktionsräume der Makro-, Meso- und Mikroporen in Abhängigkeit der mittels Volumen und Äquivalentradius berechneten Oberfläche einer Porenklasse verteilt. Die verwendeten Äquivalentporenradien (R) mit 5×10^{-8} , 10×10^{-8} bzw. 500×10^{-8} m entsprechen für die Meso- und Makroporen dem angegebenen unteren Klassenrand der Mittel- bzw. Grobporenklassen und für die Mikroporen dem Mittelwert der Feinporenklasse aus SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL (1992). Der Kohlenstoff der dabei den

Mikroporen zugeordnet wird, ist aufgrund der vorwiegend schlechten Umsatzbedingungen langfristig stabilisiert. Die sich aus den bisher verwendeten Äquivalentradien ergebende Verteilung des Kohlenstoffs auf die Mikroporen ist für den Bad Lauchstädter „Statischen Dauerdüngungsversuch“ ähnlich dem Ansatz von KÖRSCHENS (1980) zur Berechnung des inerten Kohlenstoffanteils, mit dem für den Bad Lauchstädter Standort mit dem CANDY-Modell sehr gute Simulationsergebnisse erzielt wurden. Der Ansatz von Körschens berechnet den inerten Kohlenstoffanteil in Abhängigkeit des Ton- und Feinschluffgehaltes, ohne den Gesamtkohlenstoffgehalt eines Bodens zu berücksichtigen. Dabei kann es bei sehr ton- und feinschluffhaltigen aber kohlenstoffarmen Böden zu einer Überbestimmung des inerten Anteils kommen, der sogar über dem Gesamtkohlenstoffgehalt liegen kann. Bei der Verteilung des Kohlenstoffs nach der Porenoberfläche wird vom Gesamtkohlenstoffgehalt ausgegangen, so dass der Kohlenstoffanteil, der den Mikroporen zugewiesen wird, nie größer als der Gesamtkohlenstoffgehalt sein kann. Die Berechnungsformel für den Kohlenstoffanteil in den Mikroporen wurde bereits in das CANDY-System und in das vereinfachte CANDY-Modell CCB-Modell (CANDY Carbon Balance) als Ansatz zur Berechnung des inerten Kohlenstoffs implementiert. Bei Simulationsberechnungen für verschiedene Versuchsstandorte, die PUHLMANN et al. (2004) und FRANKO und KUKA (2005) durchführten, wurden im Vergleich zu den Ansätzen von Körschens (1980), FALLOON et al. (1998) und RÜHLMANN (1999) deutlich bessere Ergebnisse erzielt. Von FRANKO und KUKA (2005) wurden durch ein Optimierungsverfahren angepasste R mit $3,6 \times 10^{-8}$ m für die Mikroporen und $8,71 \times 10^{-8}$ m für die Mesoporen bzw. $2,11 \times 10^{-8}$ m und $12,06 \times 10^{-8}$ m unter Berücksichtigung der C/N-Wirkung ermittelt, die zur Berechnung der porenoberflächenabhängigen C-Verteilung herangezogen werden. Mit der Programmierung des CIPS-Modells und Lauffähigkeit eines Optimierungsverfahrens sollen die bisher verwendeten Äquivalentradien auch im CIPS optimiert werden, um noch bessere Simulationsergebnisse zu erzielen. Dabei sollte die porenoberflächenabhängige Verteilung des Kohlenstoffs auf die Reaktionsräume zu jedem Simulationszeitpunkt im CIPS-Modell mit der Berechnung mit dem POF-Programm übereinstimmen. Aus der Tabelle 7.1 ist ersichtlich, dass diese zum jetzigen Zeitpunkt nicht übereinstimmen. Vor allem der simulierte Kohlenstoffanteil in den Makroporen liegt deutlich über dem mit dem POF-Programm berechneten Kohlenstoffanteil. Dies bedeutet, dass der verwendete Äquivalentradius für die Makroporen verkleinert werden müsste, da so eine größere Porenoberfläche berechnet wird, der im Verhältnis mehr Kohlenstoff zugeordnet wird. Der gleiche Effekt würde bei gleich bleibenden Äquivalentradius für die Makroporen und Vergrößerung der Äquivalentradien der Meso- bzw. Mikroporen auftreten. Die Relation

für die berechneten und simulierten C-Gehalte in den Mikroporen ist relativ gut. Bei sehr hohen Gesamtkohlenstoffgehalten wie bei der STM+NPK-Variante kommt es allerdings zu deutlichen Abweichungen. Dies lässt sich modelltechnisch damit erklären, dass nur ein geringer Fluss in die Mikroporen existiert. Bei gleich bleibend hohem C-Input kommt es damit bei den Simulationsrechnungen mit dem CIPS-Modell zu einer Ansammlung des Kohlenstoffs in den Meso- bzw. Makroporen. Bei der Berechnung mit dem POF-Programm wird dagegen streng nach dem Verhältnis von Porenoberfläche zu Gesamtkohlenstoffgehalt ausgegangen, wobei den Mikroporen mit der anteilig größten Porenoberfläche der meiste Kohlenstoff zugeteilt wird.

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

	C_{org}	ROM_{Mac}	ROM_{Mes}	ROM_{Mic}	Restl. Pools ohne CO_2
	[$\mu gC/gBoden$]	[$\mu gC/gBoden$]	[$\mu gC/gBoden$]	[$\mu gC/gBoden$]	[$\mu gC/gBoden$]
Kontrolle nach 50 a					
Simulation	16245	1099	4671	9915	560
POF	16245	121	6910	9214	-
Kontrolle nach 100 a					
Simulation	15242	1671	3327	9677	567
POF	15242	113	6484	8645	-
STM+NPK nach 50a					
Simulation	22214	3485	7313	9949	1467
POF	22214	166	9449	12599	-
STM+NPK nach 50a					
Simulation	25314	6015	7832	9795	1672
POF	25314	188	10768	14358	-

Zur Diskussion steht eine Sättigungstheorie für die Mikroporen. Bei einer Beschränkung des C-Gehaltes in den Mikroporen würde bei hohen C-Gehalten bei der Initialisierung des CIPS-Modells mehr Kohlenstoff den Meso- und Makroporen zugeordnet, der einem schnelleren Abbau unterliegt. Das Versuchsfeld von Grakov weist sehr hohe Anfangskohlenstoffgehalte auf und der rasche Abbau des Kohlenstoffs kann mit dem CIPS-Modell unter Verwendung der angegebenen Bodenparameter nicht abgebildet werden (s. Abb. 5.9). Bei einer

Verschiebung der C-Verteilung zugunsten der Meso- und Makroporen wäre die Konsequenz ein schnellerer Umsatz, der zur Simulation von niedrigeren Gesamtkohlenstoffgehalten führt. Mit der jetzigen Modellstruktur liefert das CIPS-Modell gute Simulationsergebnisse (s. Kap. 5), die erkennen lassen, dass die Umsetzung einer Reihe von Forschungserkenntnissen gelungen ist. Dazu zählen die Betrachtung des Bodens im CIPS-Modell als Reaktor (RICHTER, 1986), das der Abbau aller organischer Substanz möglich ist (SKJEMSTAD, 2001; GLEIXNER et al., 2002; BRODOWSKI et al., 2003) und das die Rekalzitranz der organischen Substanz vorwiegend in der ersten Abbauphase eine Rolle spielt (Kögel-Knabner, 2002).

Zur weiteren Überprüfung des CIPS-Modells wurden für alle Versuche Langzeitrechnungen durchgeführt, mit denen kontrolliert werden soll, ob der sich bei gleich bleibendem C-Input einstellende Gesamtkohlenstoffgehalt plausible Werte annimmt. Die Ergebnisse dieser Simulationsrechnungen sind in Abb. 7.1 bis Abb. 7.5 dargestellt. Die nach 1000 jähriger Simulation erreichten C-Niveaus entsprechen für alle Versuche plausiblen Werten. Für den „Statischen Dauerdüngungsversuch“ pendelte sich der Gesamtkohlenstoffgehalt für die STM+NPK-Variante bei 2,8% C_{org} und für die Kontrollvariante bei 1,2% C_{org} ein (s. Abb. 7.1), wobei für die Kontrollvariante noch kein Gleichgewicht erreicht wurde. In Abb. 7.2 ist die Langzeitsimulation des „Ewigen Roggenbaus“ in Halle dargestellt. Die STM-Variante erreicht Gesamtkohlenstoffgehalte von 2,6 % C_{org} und die Kontrollvariante 1,1 % C_{org} . Die Kontrollvariante des Prager Versuchsfeldes B bleibt auf etwa gleichem Niveau von 1,2 % C_{org} und die STM-Variante erreicht einen Gesamtkohlenstoffgehalt von 2,7 % C_{org} (s. Abb. 7.3). In Abb. 7.4 ist ersichtlich, dass die Kontrollvariante des Grakover Versuchsfeldes kein Gleichgewicht erreicht hat. Nach 1000 jähriger Simulation liegen die simulierten C_{org} -Gehalte bei 2,1%. Die STM+NPK-Variante des „Dauerfeldversuch zur Untersuchung der organischen Substanz“ in Keszthely erreicht bei 2,0 % C_{org} einen Gleichgewichtszustand (s. Abb. 7.5). Die Gesamtkohlenstoffgehalte der Kontrollvariante steigen bei gleich bleibendem Input anfänglich an und senken sich dann wieder bis auf 1,0 % C_{org} ab. Es hat sich nach 1000 Jahren Simulation noch kein Gleichgewicht eingestellt. Aus diesen Ergebnissen lässt sich schlussfolgern, dass Langzeitversuche zur Untersuchung der organischen Substanz im Boden auch nach 102 Jahren Versuchsdauer wie beim „Statische Düngungsversuch“ in Bad Lauchstädt bzw. 127 Jahren Versuchsdauer beim halleschen Dauerversuch „Ewiger Roggenbau“ fortgeführt werden sollten.

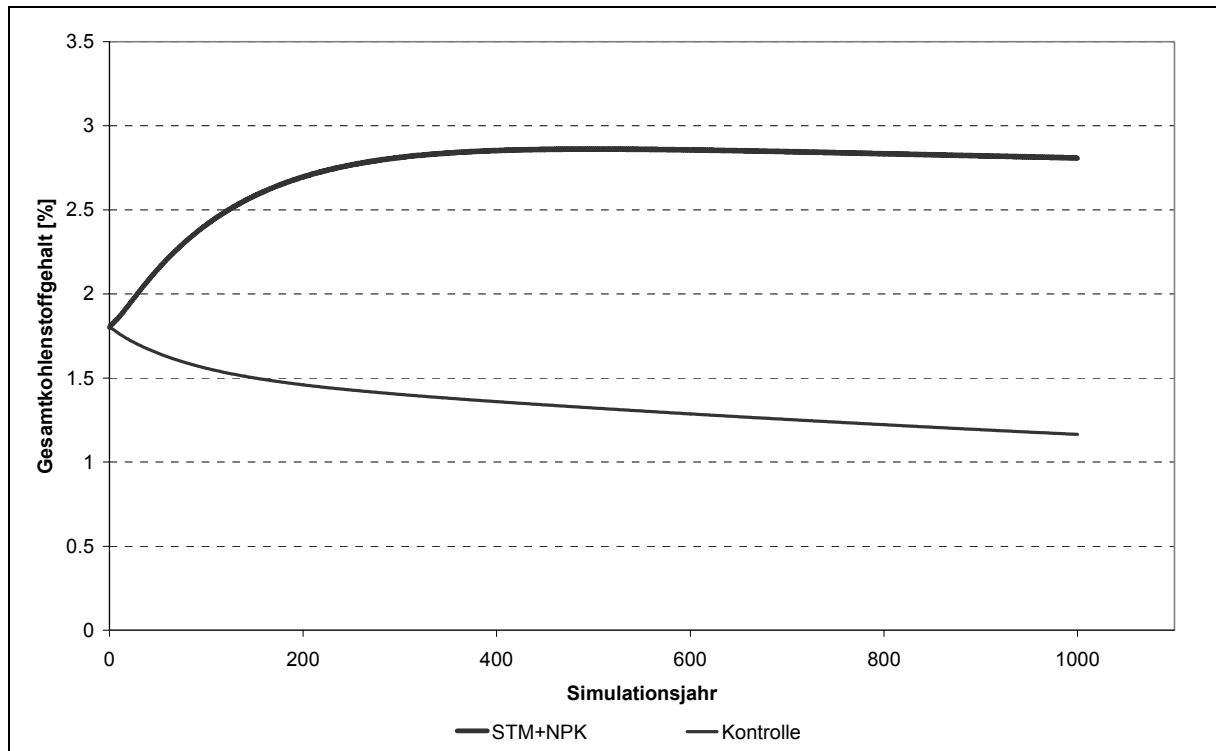


Abb. 7.1: Langzeitsimulationen vom "Statischen Dauerdüngungsversuch" Bad Lauchstädt

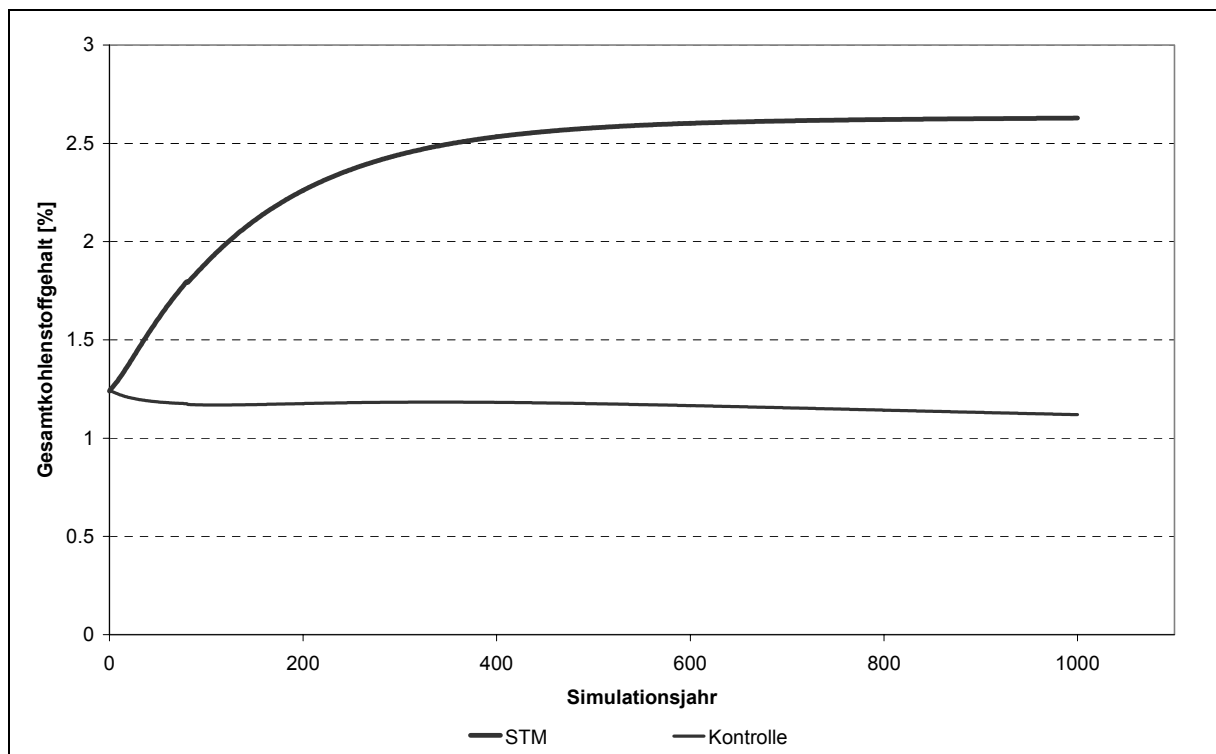


Abb. 7.2: Langzeitsimulationen vom „Ewigen Roggenbau“ Halle

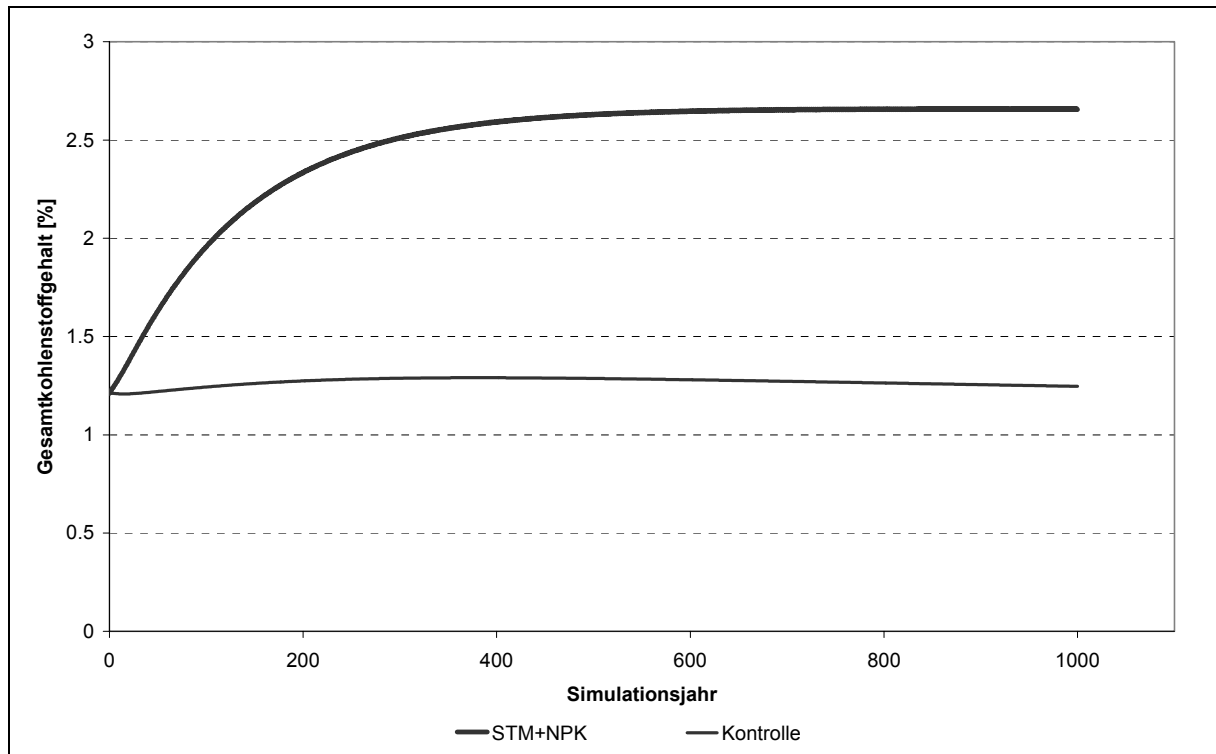


Abb. 7.3: Langzeitsimulationen vom „Versuchsfeld B“ Prag

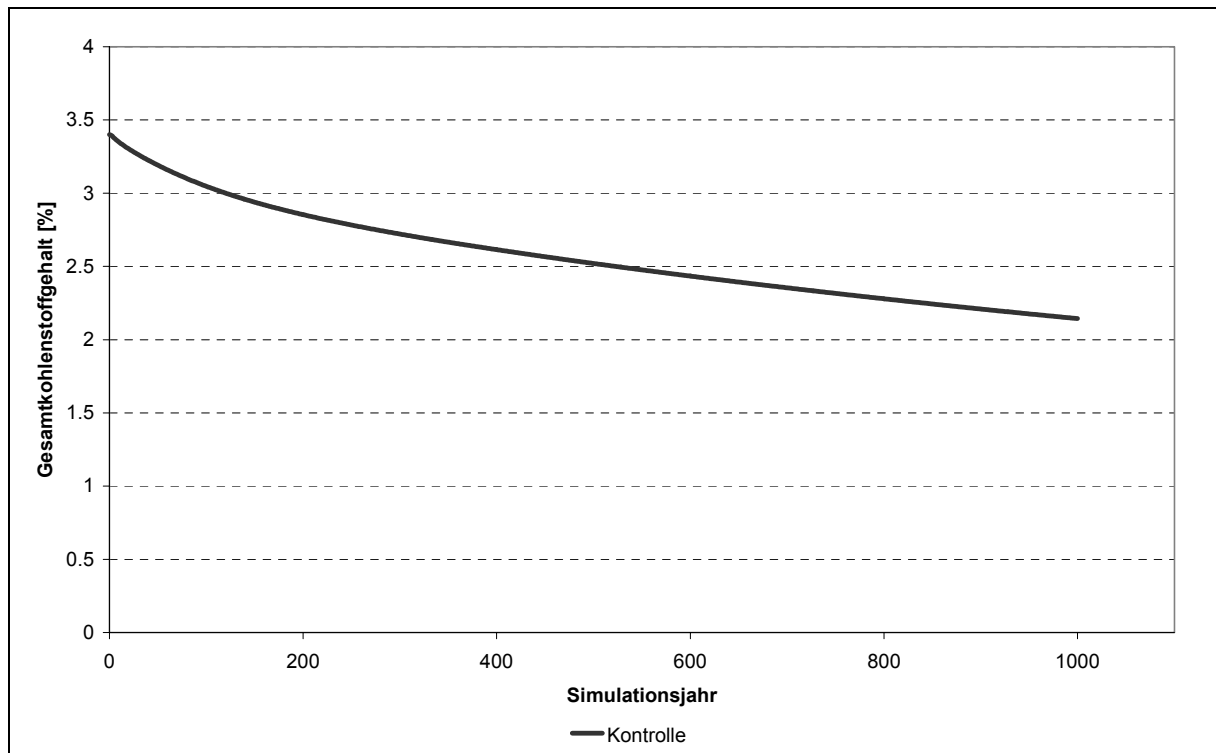


Abb. 7.4: Langzeitsimulationen vom „Grakov Versuchsfeld“ Grakov

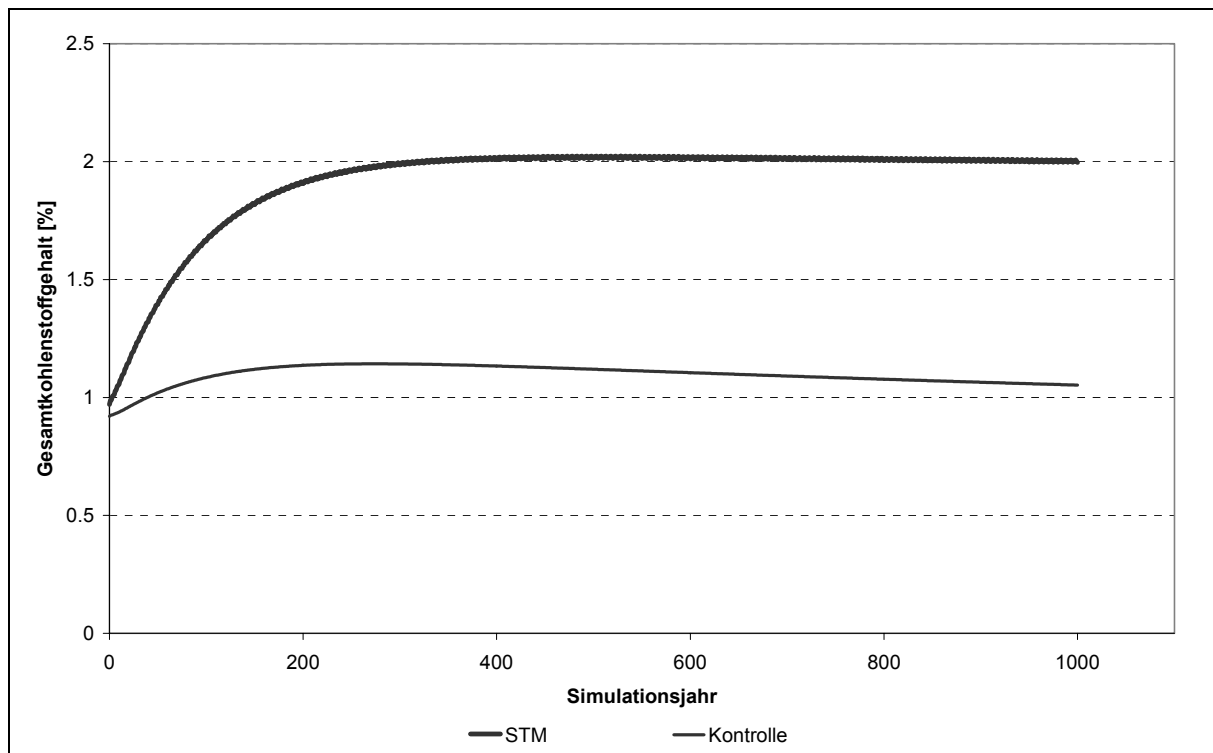


Abb. 7.5: Langzeitsimulationen vom „Dauerfeldversuch zur Untersuchung der organischen Substanz“ Keszthely

Ein wichtiger Bodenparameter ist die TRD, da sie bei Änderung den Kohlenstoffhaushalt maßgeblich beeinflusst. Deshalb sind die Kenntnisse über die Dynamik der TRD im Verlauf eines Anbaujahres und die Spannweite der TRD-Werte auf der Fläche bzw. im Profil von besonderer Bedeutung. Die konventionelle Methode zur Bestimmung der Trockenrohddichte ist mit Entnahme von Stechzylindern sehr strukturstörend, was die häufige Messung besonders auf Versuchsfeldern unmöglich macht. Die weitgehend berührungslose Methode der TRD-Bestimmung aus Höhendifferenzen mittels Scannermessungen lassen bei genügend sichtbarer Bodenoberfläche ohne Pflanzenbestand beliebig häufige Messungen zu. Allerdings ist der Aufwand als sehr viel höher einzuschätzen, da eine Vielzahl von Daten verarbeitet werden muss. Der Vergleich der beiden Methoden zeigt eine sehr gute Übereinstimmung in den Messergebnissen.

Die Anwendung des CIPS-Modells zur Simulation des Gesamtkohlenstoffgehaltes in der STM+NPK-Variante des „Statischen Düngungsversuches“ Bad Lauchstädt unter Verwendung von unterschiedlichen TRD zeigt, dass es zu enormen Änderungen der Kohlenstoffspeicherung im Boden kommt. Daher sollte in künftigen Modellansätzen ein dynamischer TRD-Verlauf innerhalb eines Anbaujahres, tiefenabhängige TRD und Heterogenitäten der TRD auf der Fläche berücksichtigt werden. Dabei soll mit einer TRD-

Veränderung, die eine dynamische pF-Kurve bedingt, eine Neuaufteilung der Reaktionsräume einhergehen.

Insgesamt kann man dem CIPS-Modell unterstellen, dass es realitätsnahe Umsatzprozesse widerspiegelt, wobei es das Potential besitzt, weitere Mechanismen abbilden zu können, die bisher durch Modelle nicht erklärt werden konnten. Dazu zählen der unterschiedliche Kohlenstoffhaushalt in Böden mit pflugloser Bearbeitung im Gegensatz zu Böden mit konventioneller Pflugbearbeitung (ELLIOTT, 1986; GOLCHIN et al., 1994) und der auftretende Priming-Effekt bei Kohlenstoffinput (HAMER und MARSCHNER, 2005).

Um das CIPS-Modell neben der mikroskaligen Ebene auch auf der Meso- und Makroskala anwenden zu können, müssen fehlende Bodenparameter, wie PV, FK und PWP aus der Bodenart über Pedotransferfunktionen abgeleitet werden. Dazu kann der Bodengenerator von DREYHAUPT (2002) eingesetzt werden, der die Heterogenität von Modellzustandsgrößen bei der Regionalisierung abbildet.