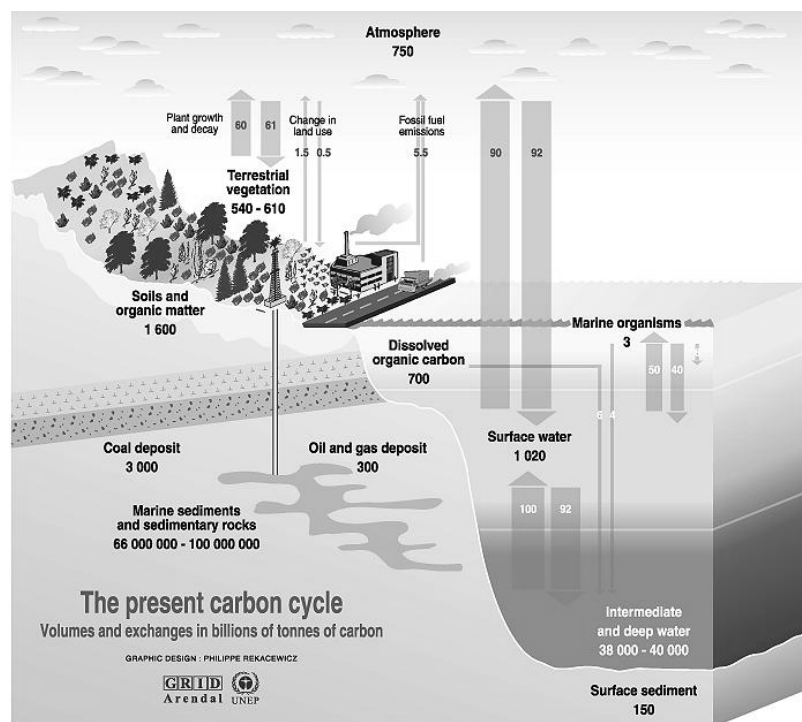


2 Grundlagen

2.1 Kohlenstoffkreislauf

Der Kohlenstoffkreislauf verbindet die Ökosysteme der Erde. Der natürliche Kohlenstoffkreislauf wird durch den Menschen beeinflusst (s. Abb. 2.1), indem große Mengen (5,5 GtC) an fossilem Kohlenstoff durch Verbrennung in die Atmosphäre emittiert werden. Zudem wird infolge von Landnutzungswechseln mehr Kohlenstoff aus dem Boden freigesetzt (1,5 GtC) als wieder gebunden (0,5 GtC) wird. Der vermehrte Kohlenstoffgehalt in Form von Kohlenstoffdioxid in der Atmosphäre führt neben anderen Gasen zum Treibhauseffekt und damit zur Erwärmung der Erde. Der Treibhauseffekt ist Gegenstand zahlreicher Forschungsarbeiten (u.a. IDSO, 1974; WILLIAMS, 1978; SARMIENTO et al., 1998; MITROVICA et al., 2001, DICKENS, 2004). Auf der Suche nach Kohlenstoffspeichern, die den erhöhten Gehalt an Kohlenstoff in der Atmosphäre kompensieren sollen, stehen vor allem die Ozeane, die Biosphäre und die Pedosphäre im Mittelpunkt der Forschung. Der Fokus dieser Arbeit ist auf die Pedosphäre und dabei auf Ackerbausysteme gerichtet. In der Pedosphäre wird fast dreimal mehr Kohlenstoff gespeichert (1600 GtC) als Kohlenstoff in der terrestrischen Vegetation (540-610 GtC) vorhanden ist (s. Abb. 2.1).



Sources: Center for climatic research, Institute for environmental studies, university of Wisconsin at Madison; Okanagan university college in Canada, Department of geography; World Watch, November-December 1996; Climate change 1995, The science of climate change, contribution of working group 1 to the second assessment report of the intergovernmental panel on climate change, UNEP and WMO, Cambridge press university, 1996.

Abb. 2.1: Der globale Kohlenstoffkreislauf (UNEP, 2003)

In Abb. 2.2 ist das Schema des Kohlenstoffkreislaufs zwischen Pedo-, Bio- und Atmosphäre im Ackerbausystem dargestellt. Die Dynamik des Kohlenstoffhaushaltes im Boden wird durch den Eintrag an Biomasse und den Abbau der organischen Substanz durch Bodenmikroorganismen bestimmt. In stabilen Systemen herrscht ein Gleichgewicht zwischen dem Eintrag an frischer organischer Substanz und der Zersetzung von organischer Bodensubstanz, so dass sich für die vorliegenden Standortbedingungen ein charakteristischer Kohlenstoffgehalt im Boden einstellt.

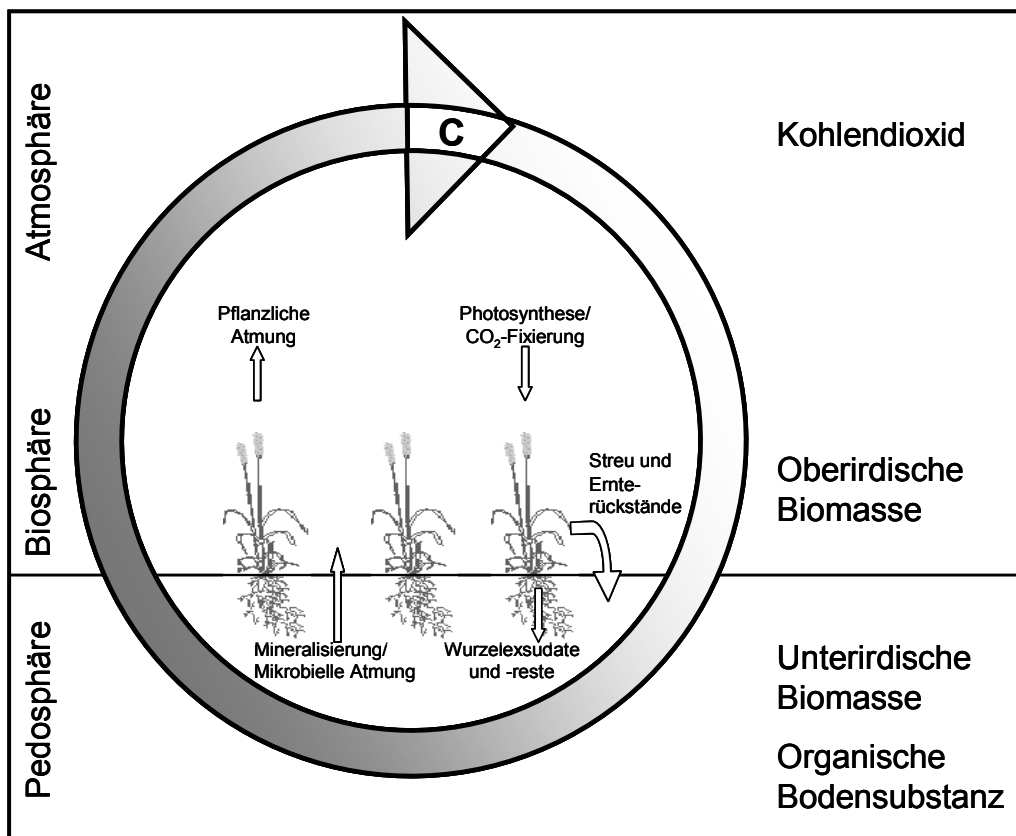


Abb. 2.2: Schema des Kohlenstoffkreislaufs im Ackerbausystem
(nach AOE/FAL, 2004)

Der Gehalt an organischer Substanz in Ackerböden ist neben den Standortfaktoren von der Art der Landnutzung abhängig. Maßnahmen, die den Eintrag an organischer Substanz in den Boden reduzieren oder den Abbau von organischer Bodensubstanz beschleunigen, führen zu einer Abnahme des Kohlenstoffgehaltes im Boden. Umgekehrt führt eine erhöhte Zufuhr an organischer Substanz oder ein verlangsamter Abbau zu einer Anreicherung von Humus im Boden. Praktiken, die zu einer Zu- oder Abnahme der organischen Bodensubstanz führen, sind in Tabelle 2.1 zusammengestellt.

Tabelle 2.1: Landnutzung und Maßnahmen, welche das Gleichgewicht des Kohlenstoffhaushaltes im Boden beeinflussen (nach NIEDER et al., 2003)

Steigerung der Kohlenstoffgehaltes	Senkung des Kohlenstoffgehaltes
Verbleib der Koppelprodukte auf dem Feld	Abfuhr der Koppelprodukte
organische und mineralische Düngung	keine Düngung
Anbau von Zwischenfrucht	Biomasseverbrennung
konservierende Bodenbearbeitung	Erhöhung Pflugfrequenz
gemischte Betriebssysteme	humuszehrende Monokulturen
Sanierung degradiertter Böden	Kultivierung von nativen Böden bzw. Degradierung von Böden
kontrollierte Beweidung	Überweidung
keine Brandrodung	Brandrodung
Aufforstung	Drainage von Feuchtgebieten
Umwandlung zu naturnahem Ökosystem	Intensivbewirtschaftung

2.2 Bodengefüge und -wasser

Neben den festen Bodenbestandteilen, dem Mineralkörper und dem Humus besteht der Boden aus einem Hohlraumsystem, das mit Wasser und Luft gefüllt ist. Das Hohlraumsystem entspricht dem Gesamtporenvolumen, welches sich in die Porengrößenbereiche der Fein-, Mittel- und Grobporen untergliedert (s. Tabelle 2.2).

Tabelle 2.2: Einteilung der Porengrößenbereiche nach dem Porendurchmesser und der Wasserspannung (SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL, 1992)

Porengrößenbereiche	Porendurchmesser [μm]	Wassersäule [cm]	pF
Grobporen, weite	> 50	1-60	0-1,8
Grobporen, enge	50-10	60-300	1,8-2,5
Mittelporen	10-0,2	300-15 000	2,5-4,2
Feinporen	< 0,2	> 15 000	> 4,2

Die Klassifizierung des Porenraums erfolgt anhand charakteristischer Kennwerte des Wasserhaushaltes. Das Wasser in den Feinporen gilt als nicht pflanzenverfügbar und entspricht der Entwässerungsgrenze beim permanenten Welkepunkt (PWP) bei einer Wasserspannung von $pF \approx 4,2$. Das pflanzenverfügbare Wasser befindet sich im Bereich der

Mittelporen bis engen Grobporen. Das Porenvolumen in diesem Bereich wird als nutzbare Feldkapazität (nFK) bezeichnet und ergibt sich aus dem Volumen der Feldkapazität (FK) [$pF \approx 1,8$ (grundwassernahe Böden) bis $pF \approx 2,5$ (grundwasserferne Böden)] (s. Kap. XVI in SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL, 1992) abzüglich des Volumens beim PWP. Das Gesamtporenvolumen abzüglich der FK umfasst den Porenraum der Grobporen, der infolge der Gravitation schnell entwässert und als Gravitationswasser (GW) bezeichnet wird.

Die Porengrößenverteilung ist von der Körnung, Kornform und dem Bodengefüge abhängig. Daher können beim Fehlen von Messwerten zum PWP oder der FK Pedotransferfunktionen angewendet werden, die auf einer Korrelation zwischen der Körnung und dem PWP bzw. der FK basieren. In Gleichung (2.1) ist ein Beispiel für die Berechnung des PWP und in Gleichung (2.2) ein Beispiel zur Berechnung der FK von LIEBEROTH (1982) angegeben.

$$PWP[\text{Vol}\%] = 1,23 + 0,74 \cdot T \quad (2.1)$$

mit

T Ton ($d < 2 \mu\text{m}$) [Vol%]

$$FK[\text{Vol}\%] = 3,4 + 0,85 \cdot AT \quad \text{bei } AT < 22\% \quad (2.2)$$

$$FK[\text{Vol}\%] = 11 + 0,52 \cdot AT \quad \text{bei } AT = 22 - 60\%$$

AT Abschlämbbare Teilchen ($d < 20 \mu\text{m}$) [Vol%] = T + Feinschluff + Mittelschluff

Das Gesamtporenvolumen (PV) lässt sich mit der allgemein bekannten Gleichung (2.3) berechnen (u.a. LIEBEROTH, 1982).

$$PV[\text{Vol}\%] = \left(1 - \frac{TRD}{TSD}\right) \cdot 100 \quad (2.3)$$

mit

TRD Trockenrohddichte [g/cm^3]

TSD Trockensubstanzdichte [g/cm^3]

Im CIPS-Modell wird das Volumen des GW den Makroporen (mac), das Volumen der nFK den Mesoporen (mes) und das Volumen bis zum PWP den Mikroporen (mic) zugeordnet.

Bodenwasser und -luft haben großen Einfluss auf nahezu alle Prozesse im Boden. Die Menge an gespeichertem Wasser im Boden ist von den mineralischen und organischen Bestandteilen abhängig.

2.3 Bodenprozessmodell CANDY

CANDY (Carbon and Nitrogen Dynamics) (FRANKO, 1989; FRANKO und OELSCHLÄGEL, 1993; FRANKO et al., 1995 a und b, 1997) ist ein mathematisches Modell, welches die C- und N-Dynamik, die Bodentemperatur und den Bodenwasserhaushalt als eindimensionale Prozesse in einem Bodenprofil in der ungesättigten Zone agrarisch genutzter Systeme simuliert (FRANKO et al., 1995 b). In Abb. 2.3 ist der Aufbau des Simulationsmodells dargestellt. Das Simulationssystem besteht aus verschiedenen Modulen, die nicht unabhängig voneinander lauffähig sind. Eine detaillierte Beschreibung des CANDY-Modells ist in FRANKO et al. (1995 b) zu finden.

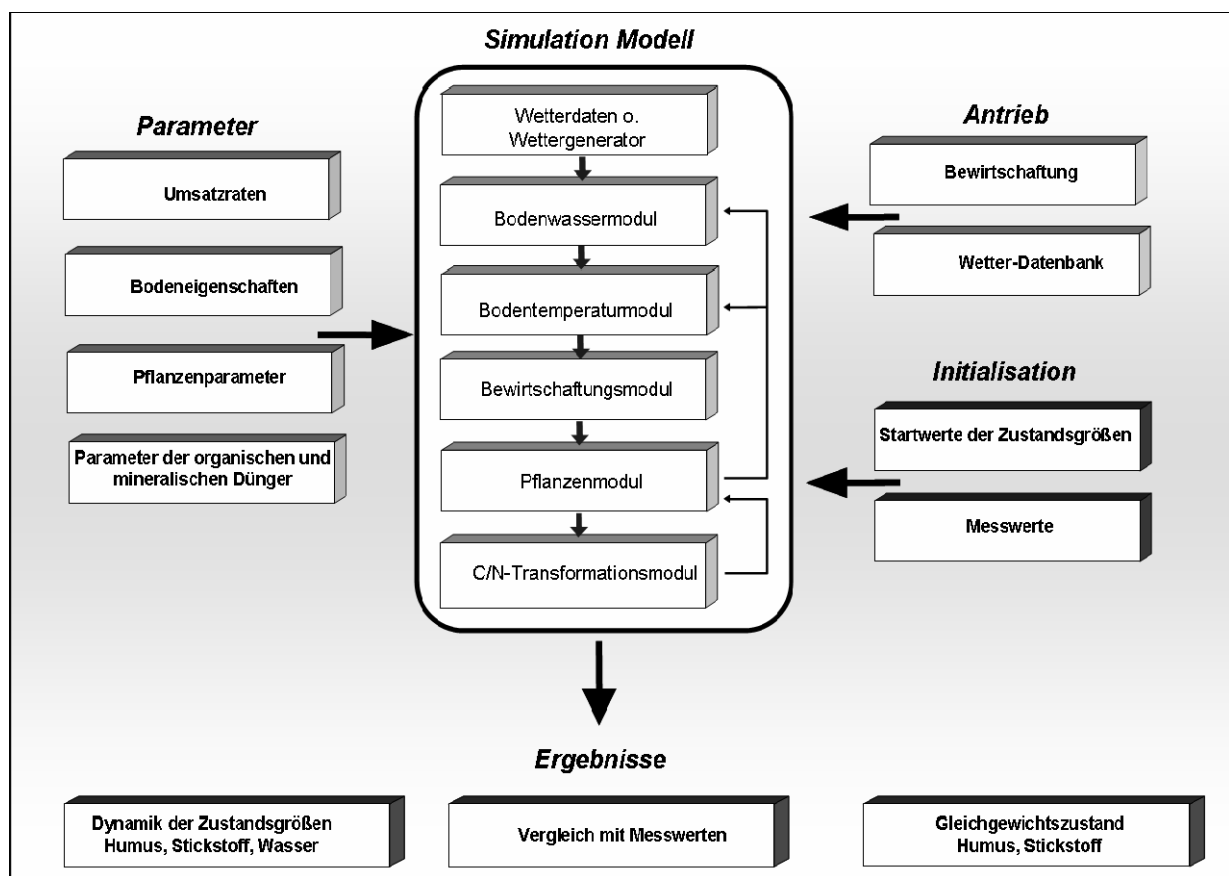


Abb. 2.3: Aufbau des CANDY-Modells (FRANKO, 1995 b)

An dieser Stelle soll nur auf das Wasser- und Temperatur-Modul vertiefend eingegangen werden, da diese Module für das Präprozessing der CIPS-Simulationen genutzt werden.

Das Wassermodul basiert nach KOITZSCH (1990) auf einem Kapazitätskonzept. Das Bodenprofil ist in homogene Schichten aufgeteilt. Ein Wasseraufstieg erfolgt nur bei einer Bodenwasserfüllung oberhalb des schichtspezifischen PWP durch die Prozesse von Evaporation und Transpiration. Bei Überschreitung des schichtspezifischen

Feldkapazitätswertes, ist aufgrund der Wasserfüllung der Makroporen eine abwärtsgerichtete Wasserbewegung möglich. Das Wasser-Modul berücksichtigt dabei die Teilprozesse:

- Versickerung von Bodenwasser durch Gravitationskräfte nach GLUGLA (1969)
- Interzeption von Niederschlagswasser nach KOITZSCH und GÜNTHER (1990)
- Berechnung der potentiellen und aktuellen Evaporation nach KOITZSCH (1990)
- Schneeakkumulation und Tauen nach KOITZSCH und GÜNTHER (1990)
- Einfluss des Pflanzenbestandes bezüglich Transpirations- und Interzeptionsfähigkeit nach KOITZSCH (1990)

Die Berechnung der Bodentemperatur erfolgt 10 cm-schichtweise bis zu einer Tiefe von 2 m aus den Eingangsparametern der Lufttemperatur und dem simulierten Bodenfeuchtegehalt aus dem Wassermodul unter Verwendung der eindimensionalen Wärmeleitungsgleichung nach einem Konzept von SUCKOW (1986), abgewandelt durch FRANKO (1995 b).

Die Reaktionskoeffizienten der Modelle CANDY und CIPS sind von Umwelteinflüssen wie Temperatur und Bodenfeuchte abhängig. Mittels Reduktionsfunktionen wird die Kalenderzeit in eine biologisch aktive Zeit (BAT–Biological Active Time; dt.: wirksame Mineralisierungszeit nach KARTSCHALL, 1986 und FRANKO, 1989) umgerechnet. Man geht davon aus, dass die Umweltparameter einen optimalen Wert aufweisen, die zu maximalen Aktivitäten führen. Bei Unter- und Überschreitung des optimalen Bereichs wird die Aktivität eingeschränkt. Für die Umweltparameter Bodentemperatur (BT), Bodenfeuchte (Θ), Bodentextur (FAT), relatives Luftvolumen (ε_L) und Bodentiefe (h) werden Reduktionsfunktionen angewendet, die mit dem Zeitabschnitt der Standardzeit Δt^* multipliziert werden, bei dem der Zeitabschnitt Δt der BAT ermittelt wird (Franko, 1995 b) [s. Gleichung (2.4)]

$$BAT(\Delta t^*) = \Delta t = R(BT, \Theta, FAT, \varepsilon_L, h) \cdot \Delta t^* \quad (2.4)$$

Der Bodentemperatureinfluss (R_{BT}) lässt sich nach FRANKO (1989) mit der Gleichung (2.5) berechnen.

$$R_T(BT) = \begin{cases} Q^{(BT-35)/10} & \text{für } BT \leq 35 \\ 1 & \text{für } BT > 35 \end{cases} \quad (2.5)$$

mit

BT Bodentemperatur [$^{\circ}\text{C}$]

$Q=2,1$ VANT'T HOFF-Konstante

In Gleichung (2.6) ist der Einfluss der Bodenfeuchte (R_{BF}) auf die Reaktionskoeffizienten nach FREITAG und LÜTTICH (1985) beschrieben.

$$R_{BF}(\Theta) = \begin{cases} 4 \frac{\Theta}{PV} \left(1 - \frac{\Theta}{PV}\right) & \text{für } \frac{\Theta}{PV} \leq 0,5 \\ 1 & \text{für } \frac{\Theta}{PV} > 0,5 \end{cases} \quad (2.6)$$

mit

Θ volumetrische Bodenfeuchte [Vol%]

PV Porenvolumen [Vol%]

Die Umsatzaktivität in tieferen Bodenschichten ist durch den eingeschränkten Luftaustausch zwischen Boden und Atmosphäre reduziert. Der Einfluss der Durchlüftung (engl. aeration) (R_A) auf die Umsatzprozesse im Boden lässt sich nach FRANKO (1989) mit der Gleichung (2.7) bestimmen.

$$R_A(FAT, \varepsilon_L, h) = \exp\left(-h \cdot \sqrt{\frac{\varphi(FAT) \cdot R_{BT}(BT) \cdot R_{BF}(\Theta)}{\varepsilon_L \cdot (\varepsilon_L - \varepsilon_p)}}\right) \quad (2.7)$$

mit

h Bodentiefe [cm]

$\varphi(FAT)$ Texturindikator (abhängig vom FAT - Partikel $\leq 6,3\mu\text{m}$)

ε_L relatives Luftvolumen [Vol%]

ε_p relatives „pocket“ Volumen (Konstante)

Die mit dem CANDY-Modell errechnete BAT entspricht der Zeit, die unter optimalen Bedingungen im Labor benötigt werden würde. Unter Freilandbedingungen wird unter unseren Klimabedingungen bspw. für den „Statischen Dauerdüngungsversuch“ in Bad Lauchstädt eine BAT von 29 d/a, für den „Ewigen Roggenbau“ in Halle 27 d/a und „Prag-Ruzyně Feld B“ in Prag 26 d/a ermittelt.

Im CIPS-Modell wird der Zeitabschnitt der mit Gleichung (2.4) ermittelten globalen BAT (BAT_{glob}) in Abhängigkeit des Status der Wassersättigung auf die einzelnen Porenklassen aufgeteilt. Dabei geht man von der Hypothese aus, dass bei einem Bodenfeuchtegehalt oberhalb der Feldkapazität nur ein Umsatz in den Makroporen möglich ist. Das heißt, unter

diesen Umständen wäre die gesamte BAT auf die Makroporen konzentriert. Mit Reduktion des Wassergehaltes unterhalb der Feldkapazität wird die BAT auf zwei Porenklassen aufgeteilt. Sinkt der Wassergehalt dabei auf ein Niveau zwischen Feldkapazität und permanenten Welkepunkt, teilt sich die BAT auf die Meso- und Makroporen auf. Bei Unterschreitung des permanenten Welkepunktes erfolgt die Aufteilung der BAT auf die Mikro- und Mesoporen.

Das Prinzip wie in (2.8) und (2.9) dargestellt, folgt der Hypothese, dass die Aktivität in Abhängigkeit zu verfügbarem Sauerstoff und wasserbenetzten Oberflächen steht, da diese die Umsatzaktivität beeinflussen.

Ist eine Porenraumklasse vollständig dräniert, wird die Aktivität in dieser Klasse durch den Teil der Oberfläche gesteuert, der durch die Feuchtigkeit der nächst kleineren Porenraumklasse benetzt wird.

$$BAT_{größer} = \frac{V_W}{V_W + V_A} \cdot BAT_{glob} \quad (2.8)$$

$$BAT_{kleiner} = \frac{V_A}{V_W + V_A} \cdot BAT_{glob} \quad (2.9)$$

mit

V_W Wassersättigungsvolumen der jeweils kleineren Porenklasse

V_A Luftvolumen der jeweils kleineren Porenklasse

BAT_{glob} globale BAT

Ein Beispiel zur Berechnung der Verteilung der BAT_{glob} bei drei verschiedenen Bodenfeuchtegehalten:

Gegeben sind folgende Bodenkennwerte:

$$BAT_{glob} = 30 \text{ d}$$

$$PV = 40 \text{ Vol\%}$$

$$FK = 32 \text{ Vol\%}$$

$$PWP = 10 \text{ Vol\%}$$

daraus folgt:

$$\text{Volumen Makroporen} = 8 \text{ Vol\%}$$

$$\text{Volumen Mesoporen} = 22 \text{ Vol\%}$$

$$\text{Volumen Mikroporen} = 10 \text{ Vol\%}$$

und folgende Bodenfeuchtegehalte:

- a) $\Theta = 33 \text{ Vol}\%$
- b) $\Theta = 25 \text{ Vol}\%$
- c) $\Theta = 6 \text{ Vol}\%$

Gesucht wird:

$$BAT_{\text{größer}}, BAT_{\text{kleiner}}$$

Lösung:

a) Da der Bodenfeuchtegehalt mit 33 Vol% größer als die FK ist, beträgt die BAT für die Makroporen 30 d und für die Meso- und Mikroporen jeweils 0 d. Der Umsatz der organischen Substanz findet ausschließlich in den Makroporen statt.

b) Bei einem Bodenfeuchtegehalt von 25 Vol% sind die Mikroporen vollständig mit Wasser gefüllt. Damit beträgt die BAT_{mic} 0 d. Das V_W der Mesoporen ergibt sich aus dem Bodenfeuchtegehalt abzüglich des PWP und beträgt 15 Vol%. Das V_A berechnet sich aus dem Volumen der Mesoporen abzüglich des V_W und beträgt 7 Vol%. Die Berechnung der $BAT_{\text{mac}}=BAT_{\text{größer}}$ nach Gleichung (2.8) und $BAT_{\text{mes}}=BAT_{\text{kleiner}}$ nach Gleichung (2.9) (s. unten) ergibt eine Aufteilung der BAT von 20,5 d auf die Makroporen und 9,5 d auf die Mesoporen.

$$BAT_{\text{mac}} = \frac{15}{15+7} \cdot 30 = 20,5$$

$$BAT_{\text{mes}} = \frac{8}{15+7} \cdot 30 = 9,5$$

c) Bei einem Bodenfeuchtegehalt von 6 Vol% sind nur die Mikroporen mit Wasser gefüllt. Für die luftgefüllten Makroporen wird die BAT gleich 0 d gesetzt. Die BAT teilt sich nach Gleichung (2.8) und (2.9) bei einem V_W von 6 Vol% und einem V_A von 4 Vol% (s. unten) mit 18 d auf die Mesoporen und 12 d auf die Mikroporen auf.

$$BAT_{\text{mes}} = \frac{6}{6+4} \cdot 30 = 18$$

$$BAT_{\text{mic}} = \frac{4}{6+4} \cdot 30 = 12$$

Im Rahmen dieser Arbeit wurde das CANDY-Modell benutzt, um die BAT_{glob} und deren Verteilung auf die Porenklassen als zusammengefassten Ausdruck der Standortbedingungen zu ermitteln.

Um das CANDY-Modell anwenden zu können, müssen meteorologische Daten, Bodenkennwerte in Form eines Bodenprofils und Bewirtschaftungsdaten als Eingangsparameter bereitgestellt werden.

Die benötigten Wetterdaten, wie in Tabelle 2.3 aufgeführt, müssen als Tageswerte oder als Monatsmittelwerte vorliegen.

Tabelle 2.3: Benötigte Wetterdaten für CANDY-Simulationen

Wetterdaten	Einheit
Mittelwert der Tagestemperatur in 2m Höhe	°C
Niederschlagssumme wahlweise:	mm
Summe der Globalstrahlung	J/cm ²
Summe der Sonnenscheindauer und geographische Breite	h

Jeder homogene Horizont eines Bodenprofils wird durch die in Tabelle 2.4 aufgeführten Parameter beschrieben.

Tabelle 2.4: Benötigte Bodenkennwerte für CANDY-Simulationen

Bodenparameter	Bezeichnung in CANDY	Einheit
Endtiefe Horizont	depth	dm
un-/gepflügt	ploughed	ja/nein
hydromorph	hydromorph	ja/nein
C _{org} -Gehalt zu Simulationsbeginn	C _{org}	%
Trockenrohddichte	BD	g/cm ³
Trockensubstanzdichte	SD	g/cm ³
Feldkapazität	FCAP	Vol%
Permanenter Welkepunkt	PWP	Vol%
FAT oder Ton- und Schluffgehalt	FPA; Clay, Silt	%
min. Stickstoffgehalt zu Simulationsbeginn	NIN0	kg/ha
gesättigte Wasserleitfähigkeit	Ks	mm/d

In Tabelle 2.5 sind die für die CANDY-Simulationen benötigten Bewirtschaftungsdaten zusammengestellt.

Tabelle 2.5: Benötigte Bewirtschaftungsdaten für CANDY-Simulationen

Bewirtschaftung	Maßnahme	Wert
Fruchtart/-folge	Aufgang der Frucht	Datum
	Ernte der Frucht	Datum
		Ertrag [dt/ha]
		Stickstoffentzug [kg/ha]
Düngung	Mineralischer Stickstoffdünger	Datum
		Aufwandmenge [kg/ha]
		Düngerart
	Organische Dünger	Datum
		Düngerart
		Frischmasse [kg/ha]
	C-Gehalt	
Bodenbearbeitung		Datum
		Art
		Bearbeitungstiefe [cm]