

Projekt Let's balance C



LE GOUVERNEMENT  
DU GRAND-DUCHÉ DE LUXEMBOURG  
Ministère de l'Agriculture,  
de l'Alimentation et de la Viticulture

# Humusbilanzierung in der Landwirtschaft: Ein Modellvergleich

Im Herbst 2022 wurde das vom landwirtschaftlichen Ministerium finanzierte Projekt „Let's balance C“ gestartet. Eines der Hauptziele des Projektes ist der Vergleich zwischen unterschiedlichen Humusbilanzierungsmodellen im Hinblick auf die Speicherung von Kohlenstoff im Boden. Im Folgenden wird ein Überblick über die unterschiedlichen Humusbilanzierungsansätze gegeben.



Rocco Liroy

## Bestandteile der Humusbilanzierung

Generell besteht eine Humusbilanz aus zwei Bereichen:

- **Die Mineralisierung der organischen Substanz im Boden.** Dieser Teil der Bilanz stellt die Anforderung der Kultur bzw. der Fruchtfolge an der organischen Bodensubstanz (OBS, hier: Synonym für Humus) dar. Die Mineralisierung schätzt also die Menge an Humus, die über das Anbauverfahren abgebaut wird. Der Humusabbau ist ein komplexer Prozess, da er von vielen Faktoren abhängig ist. An erster Stelle

müssen Boden- und Klimaverhältnisse genannt werden. Aber auch die Bewirtschaftungsbedingungen (Fruchtfolge, organische Düngung und Bodenbearbeitung) haben einen entscheidenden Einfluss auf die Abbauraten an Humus.

- **Die Reproduktion an Humus im Boden.** Dieser Teil der Bilanz stellt seinerseits die Menge an Humus dar, die über Erntereste, Wurzelrückstände und organische Dünger dem Boden zugeführt wird. Diese Menge wirkt also der Mineralisierung der OBS entgegen. Die Humusreproduktionswirkung von organischen Substraten ist eine Funktion des Ausgangssubstrats. Unterschiedliche organische Dünger bzw. organische Kulturrückstände haben unterschiedliche Humusreproduktionsleistungen.

Abb. 1 fasst das Prinzip der Humusbilanzierung mit seinen Bilanzgliedern zusammen.

Abb. 1: Grundprinzip der Humusbilanzierung (nach Kolbe 2008)

Humuszufuhr	–	Humusabbau	=	Humussaldo
Reproduktionsleistung organischer Materialien (Ernte- und Wurzelrückstände, organische Dünger)		Wirkung von Bodenart, Klima und Anbauverfahren		Veränderung der Humusvorräte des Bodens

Das hier vorgestellte Grundmuster der Humusbilanzierung ist allgemein gültig und findet in dieser Konstellation länderübergreifend Anwendung in Bilanzierungsmodellen unterschiedlicher Komplexität. Die Humusbilanzierung hat allerdings nicht nur eine agronomische Bedeutung, um den Bedarf an OBS einer Fruchtfolge zu beurteilen, sondern auch und in zunehmendem Maße eine ökologische Komponente. Die ökologische Bedeutung der Humusbilanzierung hat verschiedene Facetten:

- Der Auf- und Abbau von Humus im Boden ist aufs Engste mit der Anreicherung bzw. Verringerung des **Stickstoffvorrates** im Boden verbunden. Mit diesem wiederum sind die Veränderung der Bodenfruchtbarkeit bzw. unerwünschte Umweltauswirkungen wie die Nitratauswaschung und die Lachgasemissionen aus dem Boden verbunden.
- Der Humusabbau ist auch mit der Verschlechterung des **Bodenzustandes** verbunden, da das Wasserspeichungsvermögen und die Stabilität des Bodengefüges von einer ausreichenden Versorgung mit OBS abhängig sind.
- Last but not least ist die im Boden gespeicherte Humusmenge eine wichtige Größe zur Bekämpfung der Klimaveränderung. Die **Speicherung von Kohlenstoff** im Boden als wesentlicher Bestandteil der OBS ist ein erklärtes Ziel der EU zur Bekämpfung der Klimaerwärmung, zur Verminderung der Treibhausgasemissionen in der Landwirtschaft und auch zur Schaffung von C-Senken für anthropogene Emissionen, welche nicht aus der Landwirtschaft stammen.

Aus all diesen Gründen ergibt sich die Bedeutung der Humusbilanzierung als wesentliches Instrument zur Beurteilung der Veränderung von agronomischen und ökologischen Eigenschaften des Bodens.

### Humusbilanzierungsmodelle

Wie angedeutet, sind die Modelle zur Bilanzierung der OBS im Hinblick auf ihre Komplexität und deren Aussagekraft sehr unterschiedlich. Diesbezüglich können die Modelle in drei Kategorien untergliedert werden (Abb. 2).

#### 1) Modelle mit reiner agronomischer Aussagekraft

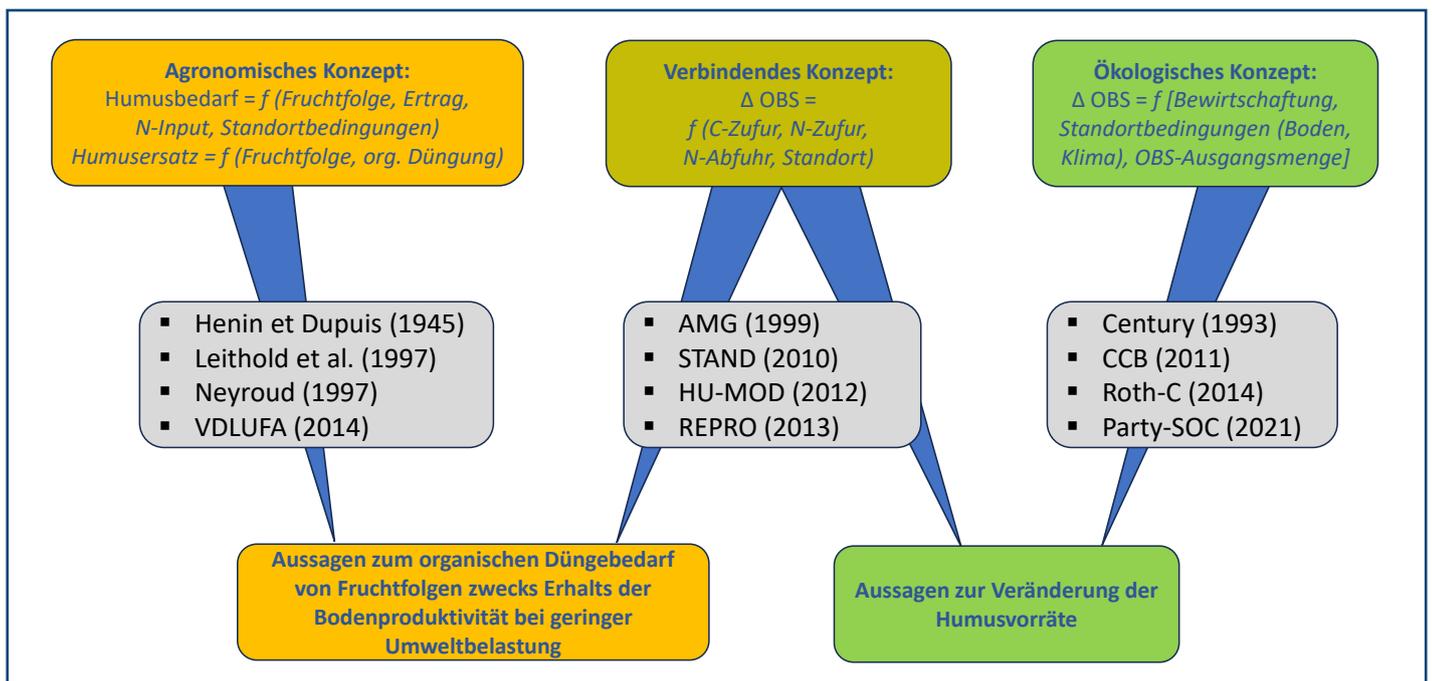
Bei den Modellen mit agronomischer Aussagekraft wird lediglich der Bedarf an OBS in der Fruchtfolge beurteilt, ohne Rücksicht auf Standorteigenschaften oder andere Standortfaktoren wie den Ausgangsgehalt an Humus bzw. Kohlenstoff im Boden. Infolgedessen ist eine quantitative Aussage betreffend die Veränderung des Kohlenstoffvorrates im Boden durch diese Modelle nicht möglich, auch wenn in einigen Fällen durch die Bilanzierung eine Schätzung der Speicherung von C-Mengen im Boden möglich ist. Zu diesen Modellen gehören:

##### a) Bilanzierung der OBS nach Hénin et Dupuis (1945), Frankreich

Diese Methode ist die älteste bekannte Humusbilanzierungsmethode auf dem europäischen Kontinent und dient heute noch in ihrer Basisstruktur als Modell für andere Bilanzierungsansätze. Diese Methode betrachtet zwei Vorgänge im Boden:

- Die Humifizierung der durch Erntereste und organischen Dünger zugefügten organischen Substanz. Die Humifizierung wird anhand sogenannter iso-humischen Koeffizienten geschätzt. Es besteht für jedes organische Substrat ein iso-humischer Koeffizient (genannt K1), der die Humusreproduktionsleistung des Materials quantifiziert.

**Abb. 2:** Eingliederung der Humusbilanzierungsmodelle nach ihrer Aussagekraft (modifiziert nach Brock et al. 2013)  
(f = Funktion; Δ = Differenz, Unterschied)



- Die Mineralisierung der vorhandenen organischen Substanz vom Boden. Nach Hénin und Dupuis ist diese Mineralisierung eine Funktion von zwei Faktoren: Tonanteil und CaCO<sub>3</sub>-Gehalt des Bodens. Das ursprüngliche Modell wurde mehrmals modifiziert. Nach Machet (1990) lässt sich der Mineralisierungskoeffizient K<sub>2</sub> folgendermaßen ableiten:

$$K_2 = 1.200 \cdot (0,2 \cdot T - 1) / [(A + 200) \cdot (0,3 \text{CaCO}_3 + 200)]$$

Das Model von Hénin und Dupuis liefert eine Prognose für die Mengen an Humus, die in einer Fruchtfolge gebraucht wird, um die Humusmineralisierung auszugleichen und zu verhindern, dass Humus abgebaut wird. Sie wurde aber nicht entwickelt, um eine Prognose hinsichtlich der Veränderung des Humusvorrates von Böden zu treffen.

#### b) Humuseinheitenmethode nach Leithold et al. (1997), Deutschland

Die Bilanzierungsmethode nach Leithold et al. (1997) berücksichtigt bei der Berechnung folgende Größen:

- Humusmenge, die von den humuszehrenden Kulturen (Getreide, Ölsaaten und Hackfrüchte) verbraucht wird.
- Humusmenge, die von den humusmehrenden Kulturen (Feldfutter, Körnerleguminosen, Zwischenfrüchte) geliefert wird.
- Humusmenge, die über Erntereste sowie über Stroh im Boden verbleiben.
- Humusmenge, die über organische Dünger geliefert wird (Gülle, Stallmist, Kompost, Klärschlamm).

Als Basis für die Berechnung dient die Humuseinheit (HE). Diese entspricht einer Tonne Humus mit 580 kg Kohlenstoff und 50 kg Stickstoff. Da der C-Gehalt vom Humus bekannt ist, ist es möglich, abzuschätzen, wie viel Kohlenstoff angereichert bzw. verloren gegangen ist. Auch kann die Humusbilanz in eine CO<sub>2</sub>-Bilanz integriert werden (wie es in der CONVIS-Methode der Fall ist), da man lediglich das Resultat von Kohlenstoff zu Kohlendioxid umrechnen muss. Eine positive Humusbilanz stellt demnach eine CO<sub>2</sub>-Senke (Carbon Credit), eine negative Humusbilanz eine Emissionsquelle dar.

Für die Methode spricht die Einfachheit der Anwendung. Auf der anderen Seite berücksichtigt diese Methode weder die Bodenbeschaffenheit (Bodentextur), noch die klimatischen Bedingungen des Standortes und auch nicht die Intensität und Art der Bodenbearbeitung. Darüber hinaus besteht bei dieser Methode keine Verbindung mit der C-Dynamik im Boden. Das bedeutet, dass über diese Methode lediglich eine Aussage bezüglich der Richtung der Veränderung der organischen Substanz (ΔC) möglich ist, nicht jedoch eine Voraussage betreffend die Menge an Kohlenstoff im Boden zu einem bestimmten Zeitpunkt.

Weitere Methoden mit reiner agronomischer Aussagekraft sind die Methode nach Neyroud (1997) aus der Schweiz und die **VDLUFAMethode zur Humusbilanzierung (2014)**, die gewisse Ähnlichkeiten mit der Humuseinheitenmethode unter Punkt b) aufweisen. Auch bei

diesen Methoden ist keine Prognose hinsichtlich der Veränderung des Humusvorrates möglich.

## 2) Modelle mit ökologischer Aussagekraft

Bei diesen Modellen steht eigentlich nicht der agronomische Aspekt im Vordergrund, sondern die Prognose der Veränderung der Kohlenstoffvorräte im Boden, in einigen Fällen auch von nicht landwirtschaftlich genutzten Böden. Diesbezüglich setzen diese Modelle sehr genaue Standort- und Bewirtschaftungsangaben voraus, so dass deren Bedienung sehr schwerfällig ist. Meistens werden die für die Speisung des Modells benötigten Daten aus langjährigen Feldversuchen abgeleitet. Die breite Anwendung auf Einzelstandorten für eine große Anzahl von Betrieben erscheint daher als nicht bzw. nur sehr schwer umsetzbar. Es gibt in der Literatur und in der Praxis verschiedene Modelle zur ökologischen Bilanzierung der organischen Substanz des Bodens. Die wichtigsten zur Anwendung bereitstehenden Modelle sind die folgenden:

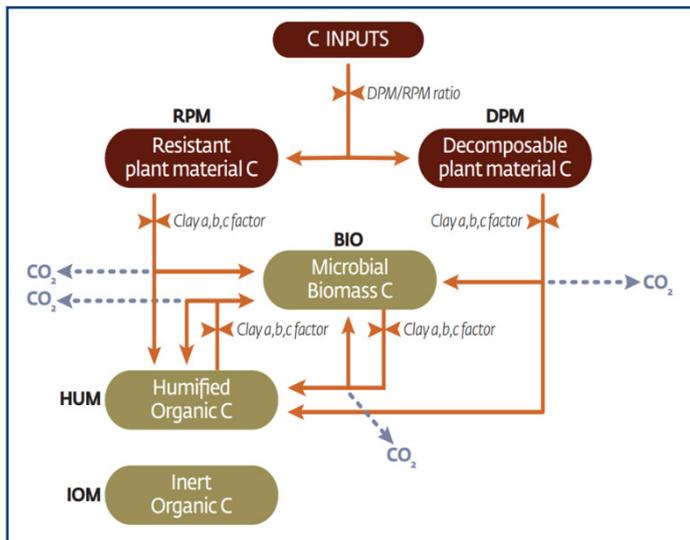
#### a) CCB nach Franko et al (2011), Deutschland

Das Candy Carbon Balance (CCB) Modell (Franko et al., 2011) ist eine einfache Ableitung des CANDY-Modells (Franko et al., 1995; Franko und Oelschlägel, 1995; Franko, 1997) und des CIPS-Modells (Kuka et al., 2007). Die CANDY-Parameter werden für die Qualitätsbeschreibung von Humus-Pools verwendet, einschließlich der ertragsabhängigen Berechnung der Menge an Ernterückständen. CCB berechnet den Umsatz von C und N im Oberboden in Abhängigkeit von Klimabedingungen, Bodeneigenschaften und Bewirtschaftungsmaßnahmen (Anbau, Bewirtschaftung, organische Düngung und Bewässerung). Ziel des Modells ist die Abschätzung der C-Speicherung als Basisinformation für die Bewertung von weiteren Bodenfunktionen. Die betrachteten Prozesse der Humusdynamik sind Mineralisierung, Humifizierung und Eintrag von frischer organischer Substanz (Ernterückstände, Nebenprodukte und organische Dünger). Der absolute Einfluss von Bewirtschaftungsmaßnahmen auf die Humus-Dynamik wird in Abhängigkeit von den Ausgangsbedingungen und standortspezifischen Parametern angegeben, die in Form der Biologisch Aktiven Zeit (BAT) ausgedrückt werden. Die Mindestanforderungen an die Dateneingabe sind:

- für den Boden: Tongehalt und Bodenart (nach der deutschen Reichsbodenschätzung, vgl. Capelle et al., 2006);
- für die klimatischen Bedingungen: langjährige Mittelwerte von Lufttemperatur und Niederschlag;
- für die Bewirtschaftung: jährliche Informationen über Ernte, Ertrag, Verwendung von Nebenprodukten, Art und Ausbringungsmenge von organischen Düngern, Bewässerungsmenge.

Bodenphysikalische Parameter wie Porenvolumen, Feldkapazität und Welkepunkt werden verwendet, um die Menge an Humus abzuschätzen, die nach dem CIPS-Modell (Kuka et al., 2007) als langfristig stabilisiert gilt. Die Validierung des CCB-Modells erfolgte auf der Grundlage von Datensätzen aus langfristigen Feldversuchen (391 Behandlungen aus 40 Experimenten) und einem Vergleich der Simulationsergebnisse mit beobachteten Werten (4.794 Messungen

Abb. 3: Struktur des Modells Roth-C



des Bodenkohlenstoff (SOC)). Der statistische Fehler des Modells beläuft sich auf 1,19 g SOC pro kg Boden. Weitere Arbeiten sind für die Modellvalidierung erforderlich in Bezug auf den Gesamtstickstoff und die mikrobielle Biomasse im Boden. Das CCB-Modell wird auf Parzellen- oder Teilparzellenebene angewendet. Die maximale zeitliche Auflösung beträgt 1 Jahr.

**b) Roth-C Modell für den Umsatz von Kohlenstoff im Boden (2014), Vereinigtes Königreich**

**Modellstruktur**

Der organische Kohlenstoff im Boden ist in vier aktive Teile und eine kleine Menge inerte (inaktiv) organischer Materie (IOM) unterteilt. Die vier aktiven Kompartimente sind zersetzbares Pflanzenmaterial (DPM), Resistentes Pflanzenmaterial (RPM), mikrobielle Biomasse (BIO) und humifizierte organische Substanz (HUM). Jedes

Kompartiment zersetzt sich nach einem Prozess erster Ordnung mit seiner eigenen charakteristischen Geschwindigkeit. IOM hingegen ist resistent gegen Zersetzung. Die Struktur des Modells ist in Abbildung 3 zu sehen.

Der in den Boden gelangende Pflanzenkohlenstoff wird zwischen DPM und RPM aufgeteilt, je nach dem DPM/RPM-Verhältnis des jeweiligen eingehenden Pflanzenmaterials. Für die meisten landwirtschaftlichen Kulturen und Anbau-Grünland wird ein DPM/RPM-Verhältnis von 1,44 an angewendet, d. h. 59 % des Pflanzenmaterials sind DPM und 41 % RPM. Für naturbelassenes Grünland und Wald (einschließlich Savanne) wird ein Verhältnis von 0,67 verwendet. Für einen Laub- oder Tropenwald wird ein DPM/RPM-Verhältnis von 0,25 verwendet, d. h. 20 % sind DPM und 80 % sind RPM. Das gesamte Pflanzenmaterial, das in den Boden kommt, durchläuft diese beiden Kompartimente nur einmal.

Sowohl DPM als auch RPM zersetzen sich zu CO<sub>2</sub>, BIO und HUM. Der Anteil, der zu CO<sub>2</sub> und BIO + HUM umgewandelt wird, wird durch den Tongehalt des Bodens bestimmt. BIO + HUM wird dann in 46 % BIO und 54 % HUM aufgespalten. Es wird davon ausgegangen, dass Stallmist (FYM) stärker zersetzt ist, als normales Pflanzenmaterial. Es wird wie folgt aufgeteilt: DPM 49 %, RPM 49 % und HUM 2 %.

**Modellparameter**

- Monatliche Niederschläge (mm)
- Monatliche Verdunstung in mm
- Monatliche mittlere Lufttemperatur
- Tongehalt des Bodens (%)
- Eine Schätzung der Zersetzbarkeit des in den Boden gelangenden Pflanzenmaterials - das DPM/RPM-Verhältnis (Decomposable/Resistent plant material ratio)
- Monatlicher Eintrag von Pflanzenrückständen (t C/ha)
- Monatlicher Eintrag an organischer Düngung (t C/ha)
- Tiefe der beprobten Bodenschicht (cm)

Tab. 1: In der STAND-Methode nach Kolbe (2010) berücksichtigte Standortfaktoren

Standortgruppe	Bodenart, Bodentyp	Feinanteil (%) des Bodens*	C/N-Verhältnis des Bodens	Durchschnittstemperatur (°C)	Niederschläge (mm je Jahr)
1	- Sand (u.a. Nord-West-D)	≤ 8	≥ ca. 14	-	-
	- Schwarzerde	ca. 17-30	-	-	-
	- Ton	≥ 38	-	-	Bergregionen ≥ 700, Flachland ≥ 800
	- stark überversorgte Böden	-	-	-	-
	- stark grundwasserbeeinflusste anmoorige und Moor-Böden	-	-	-	-
2	- Sand, anlehmiger Sand, lehmiger Sand	≤ 13	-	≤ 8,5	-
	- lehmiger Ton, Ton	≥ 28	-	-	-
3	- Sand, anlehmiger Sand, lehmiger Sand	≤ 13	-	≥ 8,5	-
4	- stark lehmiger Sand, sandiger Lehm	14-21	-	≤ 8,5	-
5	- stark lehmiger Sand, sandiger Lehm	14-21	-	≥ 8,5	-
	- Lehm	22-27	≥ 9	-	-
6	- Lehm (umsetzungsaktiv)	22-27	≤ 9	-	-
	- stark unterversorgte Böden, Meliorationsböden	-	-	-	-
	- grundwasserferne anmoorige und Moor-Böden	-	-	-	-

Weitere Methoden mit reiner ökologischer Aussagekraft sind das **Century-Modell (1993)** aus den USA und das Modell **Party-SOC (2021)** aus Frankreich. Century ähnelt in der Konzeption den Modellen CCB und Roth-C, während Party-SOC als Ziel die Aufteilung der Humusfraktionen in stabil und aktiv hat. Letzteres Modell kann dann in andere Modelle wie AMG (siehe weiter unten) integriert werden.

### 3) Modelle mit agronomisch-ökologisch verbindendem Charakter

Zu diesen Modellen gehören Bilanzierungsansätze, welche die Aussage bezgl. des Bedarfs an Humus durch die Fruchtfolge und der Ersatzleistung an OBS durch die organischen Dünger mit der Prognose der Veränderung des Bodenvorrates an Humus verknüpfen. Dazu ergänzen diese Modelle die Werte aus den agronomischen Ansätzen unter Punkt 1 mit Standortdaten (Temperatur, Tongehalt), Bodendaten (pH, Textur, Carbonatgehalt) sowie mit Daten zur Bodenbearbeitung. Zu diesen Modellen gehören:

#### a) STAND (Kolbe 2010), Deutschland

Die von Kolbe (2010) beschriebene Methode ist ein verbessertes, standortangepasstes, semiquantitatives Verfahren verglichen mit der SOC-Bilanzierung und Quantifizierung der optimalen organischen Substanzanreicherung basierend auf der VDLUFA-Methode (Stand von 2004), welches für Ackerböden verwendet werden kann. Als Abkömmling der VDLUFA-Methode (2004) zielt es auf die Erhaltung der Bodenproduktivität ab. Die Verbesserung richtet sich jedoch auf die Erhaltung eines standort- und bewirtschaftungstypischen Humusgehalts des Bodens. Zur Anpassung der VDLUFA-Methode an Standortbedingungen wurden als Standortfaktoren die Bodenart, der Feinanteil (Ton- und Schluffgehalt), das C/N-Verhältnis des Bodens, die Jahresdurchschnittstemperatur sowie die Niederschläge berücksichtigt (Tab. 1).

Das Ergebnis dieser Methode ist die bewirtschaftungsbedingte Veränderung der Humus-Speicherung ausgehend von einem Ausgangswert. Das Bilanz-Ergebnis wird einer von fünf Klassen zugeordnet (Abb.4), die eine Beurteilung der Nachhaltigkeit der Fruchtfolge und der organischen Düngung ermöglichen.

Abb. 4: Einteilung des Humussaldos in Klassen nach der Standmethode

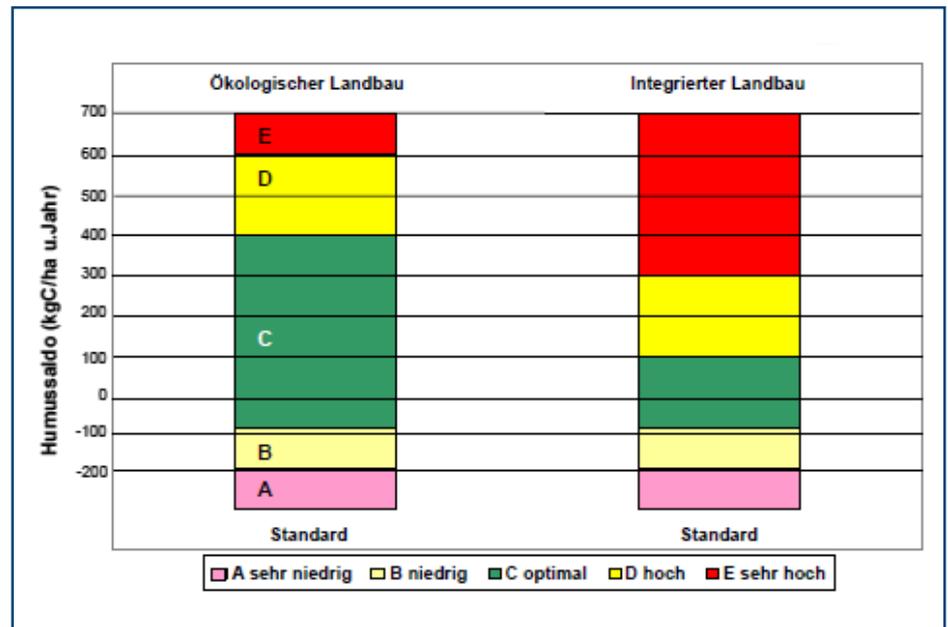
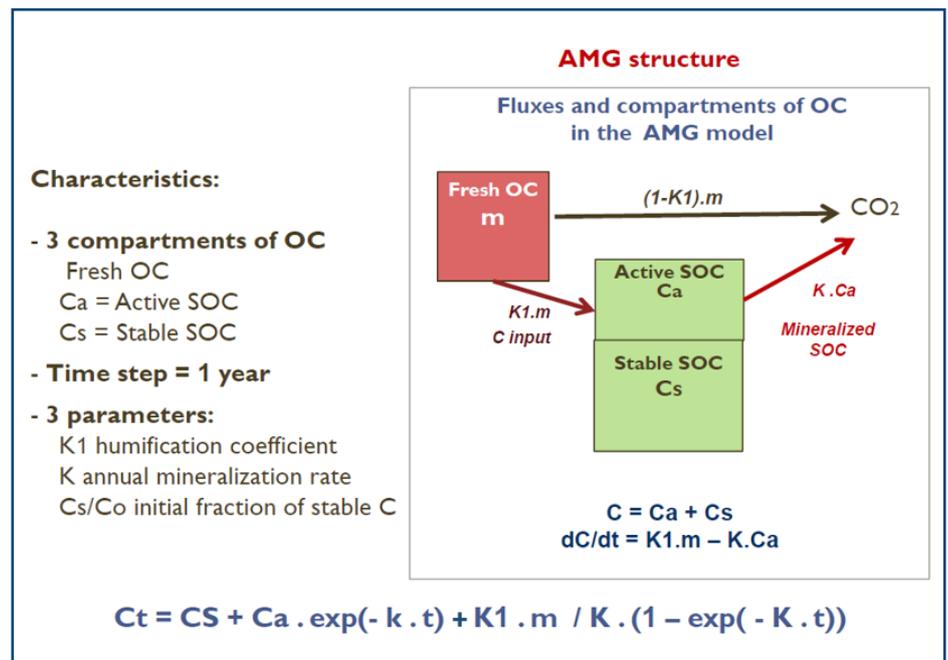


Abb. 5: Humusbilanzierung nach Andriulo et al. (1999) (OC = Organische Substanz; SOC = Bodenkohlenstoff)



Die Parameter der Methode orientieren sich an den Parametern (untere Werte) der VDLUFA-Methode, die variiert und für verschiedene Standortbedingungen anhand von Ergebnissen aus 39 Langzeitversuchen in Mitteleuropa kalibriert wurden.

#### b) AMG (Andriulo et al. 1999), Frankreich

Das AMG-Modell ist nach dessen Autoren (Andriulo, Mary und Guerif) benannt. Es ist ein Modell mit drei Kompartimenten an organischer Substanz und versteht sich als

Weiterentwicklung des Modells nach Hélin und Dupuis (siehe oben).

Die organische Substanz (Abb. 5) wird aufgeteilt in:

- Frische organische Substanz, die dem Boden als Ernte- und Wurzelrückstände sowie als organische Dünger zugefügt werden. Diese Substrate können dann humifiziert werden.

- Aktive organische Bodensubstanz, die mineralisiert werden kann.
- Stabile organische Bodensubstanz, die nicht an Mineralisierungsprozessen beteiligt ist.

Das AMG-Modell wird durch drei Gleichungen beschrieben:

$$(1) C_t = C_a + C_s$$

$$(2) dC/dt = K_1 * m - K * C_a$$

$$(3) C_t = C_s + C_a * \exp(-K * t) + K_1 * m / K * (1 - \exp(-K * t))$$

wobei:

**C<sub>t</sub>** = Gesamtkohlenstoffgehalt des Bodens zum Zeitpunkt **t**  
**C<sub>a</sub>** = aktiver Kohlenstoff, gleich 60 % für langjährige Ackerböden und 40 % für Böden, die seit kurzer Zeit nach einem Dauergrünlandumbau beackert werden  
**C<sub>s</sub>** = stabiler Kohlenstoff, an Umsetzungsprozessen nicht beteiligt  
**K<sub>1</sub>** = Humifizierungskoeffizient, spezifisch für jedes Substrat  
**K** = Mineralisierungskoeffizient, abhängig von Bodenbeschaffenheit und klimatischen Bedingungen des Standortes  
**t** = betrachteter Zeitraum

Gleichung (1) teilt die organische Substanz des Bodens in zwei Kompartimente, wobei diesbezüglich das Modell Party-SOC (2021, siehe weiter oben) herangezogen werden kann; Gleichung (2) beschreibt die Variation an Kohlenstoff im Boden im betrachteten Zeitraum; Gleichung (3) gibt den Kohlenstoffvorrat im Boden zum gewünschten Zeitraum nach Berücksichtigung der Zufuhr an organischer Substanz und der Mineralisierungsprozesse wieder.

Wie erwähnt, stellt die AMG-Methode substratspezifisch Humifizierungskoeffizienten bereit. Diese erfassen sowohl Wurzelrückstände

(Stoppel), Erntereste wie Stroh und die unterschiedlichen organischen Dünger (Gülle, Mist, Klärschlamm, Kompost), differenziert nach Herkunft und Zusammensetzung des Materials.

Der anspruchsvollste Teil der AMG-Methode ist durch die Ermittlung des Mineralisierungskoeffizienten **K** dargestellt:

$$K = k_0 * f(T) * f(H) * f(A) * f(CaCO_3) * f(pH) * f(C/N),$$

wobei:

**k<sub>0</sub>** = potenzielle Mineralisierungsrate, gleich 0,290  
**f(T)** = Funktion der mittleren jährlichen Lufttemperatur  
**f(H)** = Funktion der Bodenfeuchte als Unterschied zw. Niederschlägen (P) und Verdunstung (ETP)  
**f(A)** = Funktion des Tongehaltes  
**f(CaCO<sub>3</sub>)** = Funktion des Carbonatgehaltes  
**f(pH)** = Funktion des pH-Werts des Bodens  
**f(C/N)** = Funktion des C/N-Verhältnisses des Bodens

Für jede Funktion gibt es mindestens eine Gleichung, so, dass das Modell an Komplexität gewinnt. Das AMG-Modell ist nicht von einfacher Handhabung, erfüllt aber von allen bestehenden Modellen am weitesten die Anforderungen, zum einen den Bedarf an OBS der Fruchtfolge zu schätzen und zum anderen die Veränderung der Kohlenstoffvorräte im Boden vorauszusagen.

Es gibt im Bereich der Modelle mit agronomischen-ökologischen verbindenden Charakter noch zwei weitere Modelle, das Modell **REPRO (2003)** sowie das Modell **HUMOD (2014)**, die aber vor allem für den ökologischen Landbau bestimmt sind. Beide Modelle finden im deutschsprachigen Raum Anwendung.

## Fazit

- Es gibt in der Literatur eine Fülle von Modellen, die für die Bilanzierung der organischen Bodensubstanz angewendet werden können. Dabei haben einige Modelle lediglich eine agronomische Aussagekraft, weil sie nur den Bedarf an Humus der Fruchtfolge schätzen, aber keine Aussage hinsichtlich der Veränderung der Humusvorräte im Boden ermöglichen.
- Bei den Modellen mit ökologischer Aussagekraft wird dagegen die Kohlenstoffveränderung im Boden geschätzt, der agronomische Bedarf einer Fruchtfolge aber ignoriert. Diese Modelle speisen sich über eine Fülle von standortbezogenen Parametern und sind daher vor allem für die Wissenschaft von Interesse.
- Schließlich gibt es die Modelle mit verbindender agronomischer und ökologischer Aussagekraft. Hier werden sowohl der Bedarf an Humus der Fruchtfolge als auch die Veränderung der Kohlenstoffvorräte im Boden geschätzt. Unter den vorhandenen Modellen verspricht das AMG-Modell nach Andriulo et al. (1999) das am INRAE (Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement) in Frankreich entwickelt wurde, die interessantesten Ergebnisse zu liefern.