

# FORSCHUNGSRING

## Das Humusbilanzmodell HU-MOD: dynamische Ermittlung einer gekoppelten C- und N-Bilanz in Ackerbausystemen.

Christopher Brock, 2023

### Einleitung:

Das Modell HU-MOD (Brock et al. 2012, Knebl et al. 2015) wurde von Wissenschaftler\*innen der Universitäten Giessen und Freising-Weihenstephan entwickelt. Es stellt eine Weiterentwicklung der Humusbilanzmethode von Hülsbergen (2003) dar, die im bekannten REPRO-Modell und im DLG-Nachhaltigkeitszertifikat angewendet wird. Beide Humusbilanzmethoden basieren auf dem Ansatz von Leithold (1991), der eine funktionale Beziehung definierte, um den Bedarf an organischer Substanz in unterschiedlichen Fruchtfolgen zu berechnen. Leithold verwendete die Stickstoffaufnahme der Kulturpflanzen als Indikator für die Inanspruchnahme von mineralisiertem N aus der organischen Bodensubstanz und berechnete auf dieser Grundlage den Ersatzbedarf an organischer Substanz. Andere N-Quellen (mineralische Düngung, atmosphärische Deposition und –bei Leguminosen-symbiotische Fixierung) müssen dabei natürlich berücksichtigt werden (Abbildung).

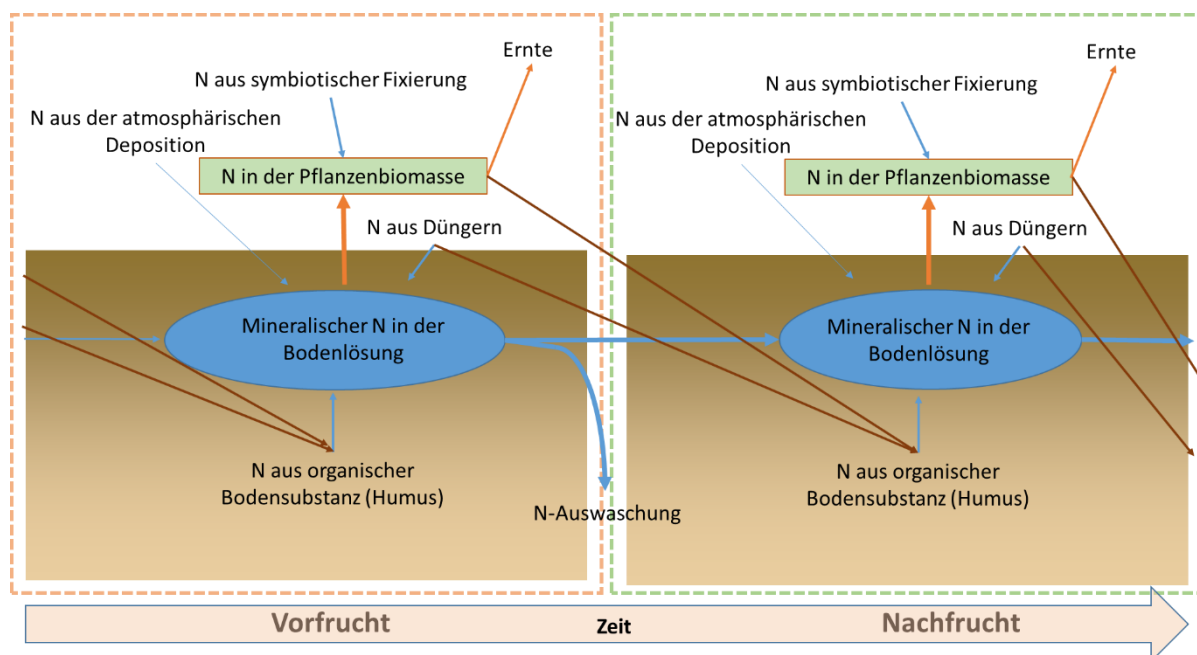


Abbildung: N-Bilanz im System Boden-Pflanze als Grundlage der Humusbilanzierung.

Der Vorteil gegenüber einer auf den Kohlenstoff bezogenen Bilanz ist, dass die N-bezogene Bilanzierung die Notwendigkeit einer Bewertung von Umsatzfaktoren der organischen Bodensubstanz am Standort umgeht und stattdessen eine einfach zu erhebende Größe als Bezug verwendet, die einen Rückschluss auf das Umsatzgeschehen zulässt. Für die Praxisanwendung ist der N-bezogene Ansatz daher klar vorzuziehen.

Die Anwendbarkeit des Modells HU-MOD wurde in einer regulären Validierung bestätigt. Tatsächlich gehört das HU-MOD damit zur sehr kleinen Gruppe validierter Humusbilanzmodelle (vgl. Review von Brock et al. 2013). Allerdings hat sich gezeigt, dass das Modell in mineraldüngerbasierten Systemen weniger gut funktioniert. Dies liegt vermutlich daran, dass für eine korrekte Einschätzung der N-Flüsse im Boden bei schnell verfügbaren N-Quellen eine genauere Parametrisierung von Bodenfaktoren notwendig wäre, die im Modell im Sinne der Praxisanwendbarkeit bisher vermieden wird.

### Modellbeschreibung

Das Modell HU-MOD berechnet Mengenänderungen der organischen Bodensubstanz an einem Standort unter Nutzung der N-Aufnahme in den Kulturpflanzen als Response-Indikator des spezifischen Umsatzes der organischen Bodensubstanz unter den gegebenen Bedingungen. Auf diese Weise wird die Notwendigkeit einer Parametrisierung der ökologischen Faktoren des Umsatzes der organischen Substanz im Boden umgangen. Allerdings müssen die Beiträge sonstiger Quellen (insbesondere biologische N-Fixierung und Düngung) an der N-Versorgung und Auswaschungsverluste von mineralisiertem Stickstoff berücksichtigt werden. Der Aufbau neuer organischer Bodensubstanz wird anhand der C- und N-Inputs mit Pflanzenbiomasse (Grün- und Strohdüngung, Ernte- und Wurzelrückstände) und aus organischen Düngern berechnet, wobei Verluste wiederum berücksichtigt werden.

### Abbau organischer Bodensubstanz

Der Abbau organischer Bodensubstanz (SOMLOSS) ist im Modell die Summe von N-Aufnahme der Pflanzen und unproduktiven N-Verlusten. Berücksichtigt werden dabei a) der Beitrag anderer Quellen zur N-Versorgung der Pflanzen, sowie b) Standorteinflüsse auf die N-Auswaschung.

$$\text{SOMLOSS} = (\text{NPB} - \text{NBNF} - \text{NFTLZ} - \text{NDEP} + \text{NLOSS}) * \text{SITECN}$$

*SOMLOSS: Abbau organischer Bodensubstanz (kg Boden-C); NPB: N in Pflanzenbiomasse (kg N); NBNF: N aus biologischer N-Fixierung (kg N); NFTLZ: N aus Düngern (kg N); NADEP: N aus atmosphärischer Deposition (kg N); NLOSS: N-Verluste aus dem Boden (kg N); SITECN: C:N-Verhältnis im bewerteten Bodenvolumen.*

NPB ist hier die Summe der N-Mengen in ober- und unterirdischer Biomasse. Unterschieden werden die Fraktionen Hauptprodukt (pflanzenartspezifisches Ernteprodukt), Nebenprodukt

(optionales Ernteprodukt wie Stroh, Rübenblatt, usw.), Streu (oberirdischer Bestandesabfall während der Vegetationsperiode), Stoppel (Wurzelstock mit Stängelbasis und Wurzeln (Wurzelmasse einschließlich Exudaten).

$$\text{NPB} = \text{NMP} + \text{NSP} + \text{NLIT} + \text{NSTB} + \text{NRTS}$$

*NPB: N in der Pflanzenbiomasse (kg N); NMP: N im Hauptprodukt (kg N); NSP: N im Nebenprodukt (kg N); NLIT: N in der Streu/im Bestandesabfall (kg N); NSTB: N in der Stoppel (kg N); NRTS: N in Wurzeln (kg N).*

Die N-Mengen in den einzelnen Fraktionen werden auf Grundlage der spezifischen Gehalte in der Trockenmasse berechnet:

$$N [\text{MP,SP,LIT,STB,RTS}] = \text{FM}[\text{MP,SP,LIT,STB,RTS}] * \text{DMCONT}[\text{MP,SP,LIT,STB,RTS}] * \text{NCONT}[\text{MP,SP,LIT,STB,RTS}]$$

*N [MP,SP,LIT,STB,RTS]: N-Menge in Hauptprodukt, Nebenprodukt, Streu, Stoppel, Wurzeln (kg N); FM[...]: Frischmasse der Fraktionen (kg FM); DMCONT[...]: Trockenmassegehalt der Fraktionen; NCONT[...]: N-Gehalt in der Trockenmasse der Fraktionen.*

DM- und N-Gehalte können ebenso wie die Massen der einzelnen Fraktionen im Modell eingegeben werden, falls die entsprechenden Daten vorliegen. Andernfalls werden die Massen über Allokationsfaktoren auf Grundlage der Trockenmasse des Ernteproduktes berechnet.

$$\text{DM}[\text{SP,LIT,STB,RTS}] = \text{DMMP} * \text{AF}[\text{SP,LIT,STB,RTS}]$$

*DM[SP,LIT,STB,RTS]: s. oben; DMMP: Trockenmassegehalt im Hauptprodukt; AF[...]: Allokationsfaktoren der Fraktionen.*

Die Allokationsfaktoren sind jeweils als Quotient aus Fraktionsmenge (SP,LIT,STB,RTS) und Hauptproduktmenge angegeben. Die Multiplikation der Hauptproduktmenge (Trockenmasse) mit dem jeweiligen Allokationsfaktor ergibt daher die jeweilige Fraktionsmenge.

Auch die Trockenmasse des Hauptproduktes ist für alle Pflanzenarten im Modell hinterlegt, falls entsprechende Daten nicht verfügbar sind.

Die N-Menge in NPB aus biologischer Fixierung wird auf Grundlage literaturbezogener Faktoren berechnet. Diese Faktoren werden bisher auf NPB und damit auf die gesamte Pflanze bezogen. Eine Differenzierung der N-Anteile aus BNF in den verschiedenen Pflanzenfraktionen findet bisher in Ermangelung einer ausreichenden Datengrundlage nicht statt, ist aber grundsätzlich denkbar. Falls Daten zum Anteil von BNF in NPB vorliegen, können diese eingegeben werden.

Die biologische Fixierung von N ist negativ mit der Verfügbarkeit von N im Boden korreliert. In Anlehnung an Ergebnisse von Möller (2008) wird im Modell vereinfachend angenommen, dass die N-Fixierung mengenmäßig proportional zum Angebot an N aus anderen Quellen abnimmt.

$$\text{NBNF} = \text{NPB} * \text{BNF} - \text{NFTLZ} - \text{NADEP}$$

*NBNF: N aus biologischer Fixierung (kg N); NPB: s. oben; BNF: Anteil von N aus biologischer Fixierung an NPB (Faktor); NFTLZ, NADEP: s.oben.*

Die Aufnahme von Dünger-N wird berechnet auf Grundlage der im Anwendungsjahr verfügbaren N-Mengen aus den applizierten Düngern unter Berücksichtigung von Auswaschungsverlusten.

$$\text{NFTLZ} = \text{FMFTLZ} * \text{FTLZTM} * \text{FTLZN} * \text{FTLZNAV} * \text{FTLZNUE}$$

*NFTLZ: s.oben; FMFTLZ: Düngermenge (kg FM); FTLZDM: Trockenmassegehalt des Düngers (Faktor); FTLZN: N-Gehalt des Düngers in der Trockenmasse (Faktor); FTLZNAV: Anteil an im Anwendungsjahr mineralisiertem N von FTLZN (Faktor); FTLZNUE: Nutzung von mineralisiertem N durch die Pflanzen (Faktor).*

Der verfügbare Anteil des in den Düngern enthaltenen N wird dabei in Abhängigkeit vom C:N-Verhältnis der Dünger berechnet.

$$\text{FTLZNAV} = 1,6674 * \text{FTLZCN} - 0,768$$

*FTLZNAV: s.oben; FTLZCN: C:N-Verhältnis des Düngers.*

Die Parameter der Funktion zur Berechnung von FTLZNAV wurden definiert auf Grundlage der Angaben bei Gutser & Ebertseder (2005).

Bezüglich der Nutzungseffizienz des verfügbaren N wird im Modell vereinfachend angenommen, dass N-Auswaschungsverluste nur in vegetationsfreien Zeiten auftreten. Die Nutzungseffizienz ist daher

$$\text{FTLZNUE} = 1 - \text{NLOSS}$$

Hierbei wird NLOSS nach Burns (1976) auf Grundlage von Porenvolumen und Niederschlagssumme berechnet:

$$\text{NLOSS} = [ \text{PRECIP} / (\text{PRECIP} + \text{PV}) ] d$$

*FTLZNUE: Ausnutzungsrage für Dünger-N (Faktor); NLOSS: N-Auswaschungsverluste (kg N); PRECIP: Niederschlag in der vegetationsfreien Zeit (cm m<sup>-1</sup>); PV: Porenvolumen des Bodens (dezimal); d=Referenz-Bodentiefe, hier 90 cm-30 cm Einarbeitungshorizont = 60 cm*

Als Grenz-Bodentiefe werden im Modell standardmäßig 90 cm angenommen, d.h. NLOSS bezieht sich auf den tiefer als 90cm verlagerten N. Die Grenz-Bodentiefe kann nach Bedarf bzw. bei entsprechender Datenlage angepasst werden. Die eingehende Niederschlagsmenge

kann bei Vorlage entsprechender Wetterdaten exakt angegeben werden und bezieht sich auf die Niederschlagssumme zwischen der Ausbringung des Düngers und der Ausbildung einer ausreichenden Wurzelarchitektur der bewerteten Fruchtart. Da hierzu in der Regel keine Daten vorliegen, wird die Niederschlagssumme vereinfachend als Jahresniederschlag \* 0,5 berücksichtigt. Werden Zwischenfrüchte angebaut, wird vereinfachend ein NLOSS von 0 angenommen.

Die Umrechnung von kg N in kg Boden-C erfolgt auf Grundlage des C:N-Verhältnisses im Oberboden der bewerteten Fläche. Berechnung im Modell werden standardmäßig auf die Fläche von 1 ha bezogen.

### **Aufbau organischer Bodensubstanz**

Der Aufbau organischer Substanz aus Pflanzenbiomasse bzw. Pflanzenrückständen und Düngern wird berechnet als:

$$\text{SOMSUP} = \text{MINIMUM} [ \text{CSUP}; \text{NSUP} * \text{SITECN} ]$$

*SOMSUP: Aufbau organischer Bodensubstanz (kg C); CSUP: C-Nachlieferung (kg C); NSUP: N-Nachlieferung (kg N); SITECN: s.oben.*

Damit wird dem Umstand Rechnung getragen, dass sowohl C, wie auch N den Aufbau organischer Substanz limitieren können (Schimel & Weintraub 2003). Da sich das C:N-Verhältnis im Feinboden von Ackerböden an einem Standort on der Regel nur geringfügig und über längere Zeiträume ändert, ist der maximale Aufbau organischer Bodensubstanz im Modell die Menge an C und N, die eine Konstanz des C:N-Verhältnisses im Boden am bewerteten Standort gewährleistet.

Der Eintrag an C entspricht im Modell der Gesamtmasse an C aus auf der Fläche verbleibender Pflanzenbiomasse und Düngern:

$$\text{CSUP} = \text{CMP} + \text{CSP} + \text{CLIT} + \text{CSTB} + \text{CRTS} + \text{CFTLZ}$$

*CSUP: s. oben; CMP: C-Input aus dem Hauptprodukt/Gründüngung (kg C); CSP: C-Input aus dem Nebenprodukt/Stroh (kg C); CLIT: C-Input aus Streu (kg C); CSTB: C-Input aus Stoppeln (kg C); CRTS: C-Input aus Wurzeln (kg C); CFTLZ: C-Input aus Düngern (kg C).*

CMP und CSP können dabei jeweils den Wert 0 annehmen, wenn Hauptprodukt (MP) oder Nebenprodukt (SP) geborgen wurden. Die C-Mengen berechnen sich im Einzelnen wie folgt:

$$\text{C}[\text{MP,SP,LIT,STB,RTS}] = \text{FM}[\text{MP,SP,LIT,STB,RTS}] * \text{DMCONT}[\text{MP,SP,LIT,STB,RTS}] * \text{CCONT}[\text{MP,SP,LIT,STB,RTS}]$$

und

$$\text{CFTLZ} = \text{FMFTLZ} * \text{DMCONTFTLZ} * \text{CCONTFTLZ}$$

*C[MP...]: s. oben; FM[MP...]: Frischmasse der Fraktionen (kg); DMCONT[MP...]: Trockenmassegehalt der Fraktionen (Faktor); CCONT[MP...]: C-Gehalte der Fraktionen (Faktor); CFTLZ: s. oben; FMFTLZ: Frischmasse der org. Dünger (kg); CMCONTFTLZ: Trockenmassegehalte der org. Dünger (Faktor); CCONTFTLZ: C-Gehalte der org. Dünger (Faktor)*

Die N-Inputs werden auf Grundlage der N-Mengen aus der SOMLOSS-Berechnung geschätzt:

$$NSUP = NLIT + NSTB + NRTS + NREM$$

*NSUP: s. oben; NLIT: N-Input aus Streu (kg N); NSTB: N-Input aus Stoppeln (kg N); NRTS: N-Input aus Wurzeln (kg N); NREM: N-Input aus organischen Düngern einschl. Gründüngung und Stroh (kg N).*

Falls Pflanzen als Gründüngung verwendet werden, oder falls das Nebenprodukt auf der Fläche verbleibt, wird dies jeweils als Dünger bei der Folgefrucht angerechnet und ist dann dort in NREM enthalten:

$$NREM = NSUPFTLZ - NAVFTLZ$$

*NREM: s. oben; NSUPFTLZ: Gesamt-N-Input mit organischen Düngern (kg N); NAVFTLZ: im Anwendungsjahr mineralisierte N-Menge (kg N).*

Dabei ist NSUPFTLZ der Gesamt-N-Input mit dem spezifischen Dünger:

$$NSUPFTLZ = FMFTLZ * DMCONTFTLZ * FTLZN$$

und NAVFTLZ die Menge des aus dem Dünger mineralisierten N:

$$NAVFTLZ = FMFTLZ * DMCONTFTLZ * FTLZN * FTLZNAV$$

*NSUPFTLZ, FMFTLZ, DMCONTFTLZ: s. oben; FTLZN: N-Gehalt der organischen Dünger (Faktor); FTLZNAV: Anteil des im Anwendungsjahr mineralisierten N aus org. Düngern (Faktor).*

Dünger sind in diesem Sinne alle organischen Dünger, Gründüngung, Stroh und N-Mineraldünger.

## **Bilanz**

Die Bilanz ergibt sich aus der Differenz von Aufbau (SOMSUP) und Abbau (SOMLOSS) organischer Substanz:

$$SOMBALC = SOMSUP - SOMLOSS$$

*SOMSUP, SOMLOSS: s. oben; SOMBALC: Bilanz der organischen Substanz im Boden (kg C)*

Zusätzlich wird die Bilanz in kg N in der organischen Bodensubstanz (SOMBALN) ausgewiesen. Dabei ist

$$SOMBALN = SOMBALC / SITECN$$

*SOMBALN: Bilanz der organischen Substanz im Boden (kg N)*

## Anwendungsfälle

Mit dem Humusbilanzkalkulator können flächenbezogene Humusbilanzen berechnet werden. Die Berechnung erfolgt dabei auf Grundlage der zeitlichen Abfolge der einzelnen angebauten Fruchtarten. Die aussagekräftigste Anwendung ist die Bewertung einzelner Flächen über einen definierten Zeitraum. Hier wird klassischerweise der Fruchtfolgeumlauf als Bezug gewählt, sofern eine mehr oder weniger feste Fruchtfolge eingehalten wird. Falls nicht, ist die Bewertung längerer Zeiträume stets aussagekräftiger, als die Bewertung kurzer Zeiträume.

Ein klassischer Anwendungsfall von Humusbilanzen ist weiterhin die Bewertung auf Betriebsebene, wobei die Gesamtheit aller Flächen in einem Anbaujahr die Datengrundlage darstellt. Diese Anwendung macht allerdings nur Sinn, falls die angebauten Fruchtarten zugleich die Fruchtfolge(n) widerspiegeln und sich die Flächen bezogen auf den Ertrag nicht zu unterschiedlich darstellen. Ansonsten verzerren sowohl die Fruchtarten auf ertragsschwachen Schlägen, wie auch die Fruchtarten auf ertragsstarken Schlägen die Bilanz für das gewählte Jahr, da ein Ausgleich über die Zeit nicht erkannt wird. Eine Bewertung auf Betriebsebene sollte daher nicht auf Grundlage der realen Flächen, sondern auf Grundlage der Fruchtfolgen(n) und unter Angabe der für jede Fruchtart mittleren Erträge im Betrieb erfolgen. Dazu wird für jede Fruchtart in der Fruchtfolge ein Datensatz mit einer fiktiven Flächengröße von 1 ha angelegt und die Bilanz auf dieser Grundlage berechnet.

## Interpretation der Bilanzergebnisse

Das Bilanzergebnis macht Aussagen

Zur Mengenänderung der organischen Substanz im Boden (als unscharfer Trend), sowie

Zur Umsetzung der Bodenfruchtbarkeit am Standort durch die Fruchtarten in Ertrag.

### a) Mengenänderung der organischen Bodensubstanz

Das Bilanzergebnis gibt die berechnete Veränderung der Mengen an organischer Substanz in kg C je ha und Jahr bzw. kg N je ha und Jahr an. Da es sich um eine Modellierung handelt, beinhalten die Ergebnisse einen für den individuellen Anwendungsfall nicht näher bekannten Fehler und sind daher unscharf. Die Bilanzergebnisse geben daher nur zufälligerweise einmal die reale Entwicklung der Mengen an organischer Bodensubstanz am Standort wieder und sollten eher als ungefährer Trend verstanden werden. Während allerdings eine negative Humusbilanz mittel- bis langfristig zu einer unbedingt zu vermeidenden Abnahme der Bodenfruchtbarkeit führt, verursacht eine positive Humusbilanz nur bei großem N-Überschuss möglicherweise ungünstige Effekte auf die Umwelt. Daher sollte stets eine klar positive Humusbilanz angestrebt werden (mind. +50 kg C je ha und Jahr). Gleichzeitig ist die N-Bilanz zu beachten, um ggf. auf dieser Grundlage über die Notwendigkeit einer Anpassung von Fruchtfolge und/oder Düngung zu entscheiden. Bei einer stark N-betonen Düngung (Mineraldünger, Gülle) sollte eine Anpassung der N-Versorgung allerdings zunächst über eine Korrektur der N-Düngung erfolgen, nicht über eine Absenkung der Zufuhr C-betonter organischer Dünger.

### b) Umsetzung der Bodenfruchtbarkeit in Ertrag

Das Verhältnis zwischen Nachlieferung und Umsatz organischer Substanz im Boden pendelt sich langfristig immer auf ein Fließgleichgewicht ein und damit auf eine ausgeglichene reale Humusbilanz (im Mittel über die Zeit keine C- und N-Änderung). Auf gut mit organischer

Substanz versorgten Standorten sollte daher auch die berechnete Bilanz nur schwach positiv sein.

Bei stark positiven Bilanzen ist zu prüfen, welcher der folgenden Fälle vorliegt:

- Die Zufuhr organischer Substanz führt zu über die Zeit steigenden Erträgen und zu einer Anreicherung organischer Bodensubstanz.
- Die Zufuhr organischer Substanz führt zu einer Anreicherung organischer Bodensubstanz, aber nicht zu steigenden Erträgen. In diesem Fall beeinträchtigen möglicherweise andere Faktoren als die Versorgung der Böden mit organischer Substanz die Ertragsbildung (Wasserstress, Nährstoffmangel, ...).
- Die Bilanz gibt die individuelle Situation nicht korrekt wieder.

Leider kann nur über Beobachtungen bestätigt werden, ob die Bilanz in einem konkreten Anwendungsfall zutreffend ist, oder nicht. Da das verwendete Humusbilanzmodell in Dauerfeldversuchen geprüft wurde, ist die Anwendbarkeit des Ansatzes zwar grundsätzlich bestätigt. Es kann jedoch immer eine individuelle Situation vorliegen, in der die im Modell getroffenen Annahmen nicht zutreffen. Hier ist die/der Anwender\*in als Expert\*in gefragt und muss selber entscheiden, ob das Bilanzergebnis plausibel ist. Im Zweifel kann die Anlage von Dauerbeobachtungsflächen auf Schlägen helfen, die reale Entwicklung der organischen Bodensubstanz am Standort einzuschätzen. Statistisch gesehen sollten Messreihen jedoch mindestens 5 Messdaten (5 Jahreswerte) umfassen, um halbwegs aussagekräftig sein zu können. Falls längere Fruchtfolgen gefahren werden, sollte wenigstens über einen Fruchtfolgeumlauf jährlich gemessen werden. Die Anlage von Dauerbeobachtungsflächen sollte gewissen Standards folgen.

Bei negativen Humusbilanzen muss mittel- bis langfristig mit einem Absinken der Erträge gerechnet werden, wobei der Effekt umso deutlicher auftreten wird, je mehr die Ertragsbildung von der organischen Bodensubstanz abhängt. In Systemen mit mineralischer Düngung als Grundlage der Pflanzenernährung wird der negative Ertragseffekt abnehmender Vorräte an organischer Bodensubstanz bei ansonsten guten Wachstumsbedingungen überdeckt. Allerdings führen abnehmende Vorräte an organischer Bodensubstanz auch zu einer Verschlechterung physikalischer und biologischer Bodeneigenschaften und damit auch zu einer erhöhten Gefahr von Wasserstress und Erosion.

Auch im Falle negativer Humusbilanzen sollte jedoch die/der Anwender\*in die Plausibilität der Ergebnisse kritisch hinterfragen, da auch eine negative Bilanz fehlerhaft sein kann.

### Literatur:

Brock C., Hoyer U., Leithold G., Hülsbergen K.-J. (2012): The humus balance model (HU-MOD): a simple tool for the assessment of management change impact on soil organic matter levels in arable soils. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* 92: 239-254.

Brock, C., Franko, U., Oberholzer, H.-R., Kuka, K., Leithold, G., Kolbe, H., Reinhold, J. (2013): Humus balancing in Central Europe-concepts, state of the art, and further challenges, *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 176, 3-11.

Hülsbergen, K. (2003), Entwicklung und Anwendung eines Bilanzierungsmodells zur Bewertung der Nachhaltigkeit landwirtschaftlicher Systeme. Shaker, Aachen.



Knebl, L., Leithold, G., Brock, C. (2015): Improving minimum detectable differences in the assessment of soil organic matter change in short-term field experiments, *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 178, 35-42.

Leithold, G. (1991), Zur Herleitung der Gleichung der „horizontalen“ Stickstoffbilanz. *Wissenschaftliche Zeitschrift der Universität Halle XXXX* 91 M 6, 139–145.