

Humus-Referenzwert für Ackerböden

Leitfaden für die Entwicklung eines Referenzwertes für den Vollzug

Diese Broschüre richtet sich an Exekutivorgane des Bodenschutzes und informierte Bodennutzer. Sie stellt Möglichkeiten dar, die zur Entwicklung eines Referenzwertes für den Gehalt landwirtschaftlicher Mineralböden an organischer Bodensubstanz (OBS) oder Humus zur Verfügung stehen. Sie bezieht Schweizer Regelwerke sowie die Erkenntnisse und Meinungen aus einem Workshop mit Interessensvertretern der Landwirtschaft, des Umweltschutzes und des kantonalen Vollzugs mit ein, der am 16.11.2017 stattgefunden hat.

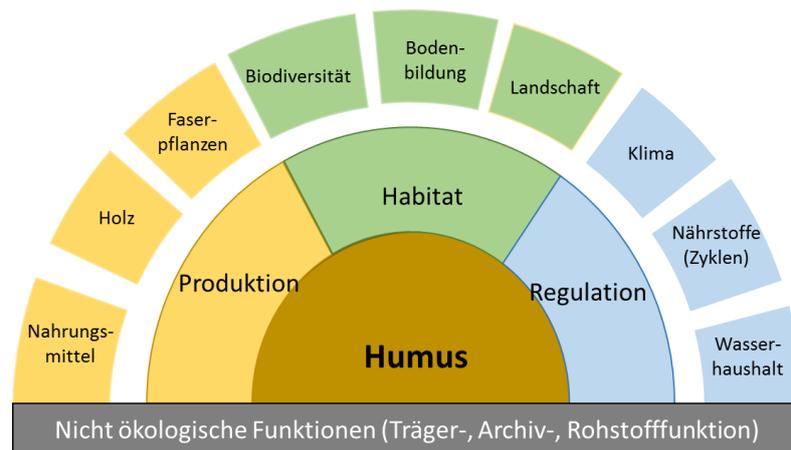


Abb. 1: Die organische Bodensubstanz beeinflusst alle ökologischen Bodenfunktionen: Die **Produktion** mit Nahrungsmitteln, Holz und Faserpflanzen, die **Regulation** mit Anpassung an und Milderung des Klimawandels, den Nährstoffzyklen und der Bedeutung für den Wasserhaushalt als Speicher und Filter, sowie die Funktion als Lebensraum und Basis für die biologische Diversität.

I. Die organische Bodensubstanz

Humus ist ein wichtiger Bodenbestandteil, der viele Funktionen des Bodens erst ermöglicht. Der Begriff Humus wird synonym als organische Bodensubstanz bezeichnet. Sie umfasst die vielfältigen organischen Verbindungen des Bodens, in ihren Stadien des Auf- und Abbaus und beinhaltet auch die lebenden Organismen. Humus enthält zwischen 55 und 60% Kohlenstoff und wird meist als organischer C gemessen. Dessen Umrechnung in Humus mit dem Faktor 1.725 ist nur eine grobe Näherung.

I.1 Die Bodenfunktionen

Der Humus ist eine Nährstoffreserve des Bodens und trägt bei zur Stabilisierung der Struktur und Porosität und zum Wasserhaushalt des Bodens (Abb. 1). Humus dient als Nahrungsquelle für Bodenorganismen und gibt ihnen einen Lebensraum in den Mikro-Nischen aus organisch-mineralischen Komplexen. Im Gegensatz dazu bauen Bodenorganismen organische Stoffe ab und bilden Humus. Die Agrar- und Forstproduktion hängt von den zahlreichen Prozessen ab, die durch Humus gefördert werden. Er ist in Verbindung mit der Photosynthese der Pflanzen und der Mineralisierung durch Bodenorganismen zugleich

Senke und Quelle für CO₂ und spielt daher eine massgebliche Rolle im Klimawandel.

Tab. 1: Globale Verteilung des Kohlenstoffs (Lal, 2008)

Sphäre	C-Reservoir (Mia Tonnen, Gt)
Atmosphäre	780
Hydrosphäre	38'000
Biosphäre	600
Boden C _{org}	1550
C _{inorg}	950

Mit 2500 Milliarden Tonnen sind im Boden etwa 0.005% der globalen C-Vorräte gebunden. Dies ist mehr als in der Atmosphäre und Biosphäre zusammen (Tab. 1). Ackerböden haben im Zuge ihrer Kultivierung 50% bis 66% Humus verloren, was etwa dem Unterschied der Gehalte von Wald und Grünland gegenüber Ackerland entspricht (Guo and Gifford, 2002; Lal, 2004; Kolbe, 2015). Dieser Verlust entspricht 42 bis 78 Gigatonnen Kohlenstoff der durch die Kultivierung und Erosion in die Atmosphäre gelangt ist. Ob das historische Niveau durch verbesserte Bodenbewirtschaftung wieder erreicht werden kann, wird kontrovers diskutiert (Lal, 2004; Leifeld *et al.*, 2005).

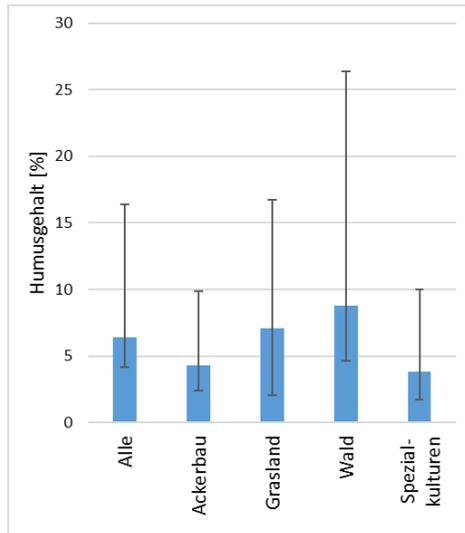


Abb. 2: Humusgehalte in Böden (0-20 cm) auf NABO Standorten nach Landnutzung (Gubler et al., 2015)

Im Messnetz der NABO der Schweiz (Abb. 2) haben Ackerböden etwa 50% weniger Humus als Grünlandböden und 62% weniger als Waldböden angezeigt (Hagedorn et al., 2018). Leifeld et al. (2005) haben für Ackerland und Grünland C-Vorräte von jeweils 40 und 50 Tonnen pro Hektar errechnet. Sie schätzen, dass 17% der Boden C-Vorräte durch Moorkultivierung, Urbanisierung und Waldrodung verloren gegangen sind.

Die intensive Nutzung des Bodens verursacht Humusverluste. Ackerböden haben daher eher tiefe Gehalte die nicht zur Findung eines optimalen Gehalts dienen können. Dieser muss sich vielmehr von optimal genutzten oder natürlichen Referenzstandorten ableiten. Aus den Organen des Bodenschutzes kommt die Frage: Bei welchem Humusgehalt sind wesentliche Funktionen des Bodens beeinträchtigt und bei der Unterschreitung welchen Humusgehalts sollten Behörden eingreifen können?

1.2 Humusdynamik

Der Humusgehalt eines Bodens ist in erster Linie vom Standort (Bodenart, Klima) und von der Primärproduktion durch Pflanzen abhängig. Landwirte können mit Bewirtschaftungsmaßnahmen wie Fruchtfolgen, Einsatz organischer Dünger, Verzicht

auf Bodenbearbeitung und schonender Umgang mit der Ressource Boden Humus aufbauen (Abb. 3). Die Humusdynamik wird bestimmt durch den Eintrag der absterbenden Biomasse der Pflanzen und der organischen Dünger und ihren Abbau durch Bodentiere und Mikroorganismen. Der zur Photosynthese gegenläufige Prozess des Abbaus ist Lebensgrundlage heterotropher Bodenorganismen, die die in den Ernteresten enthaltene Energie unter Freisetzung von CO₂ (Atmung) zum Wachstum nutzen (Sekundärproduktion) und die enthaltenen Mineralstoffe freisetzen (Mineralisierung). Die lebenden Organismen bilden dabei einen labilen Pool, der gleichzeitig auch die Triebfeder für die Dynamik des Abbaus organischer Substanz darstellt. Nur 1-3% des organischen Kohlenstoffs im Boden ist mikrobieller Kohlenstoff, dies entspricht auf einem Hektar fünf bis 30 Tonnen mikrobieller Biomasse (Blume et al., 2010; Ehlers, 2015). Die im Boden lebenden Organismen haben nicht nur die Funktion der Zersetzung organischer Rückstände, sondern sie bilden mit Pflanzen weitverzweigte Symbiosen und besiedeln ihre Wurzel, die damit vor anderen, vielleicht schädlichen Organismen geschützt wird.

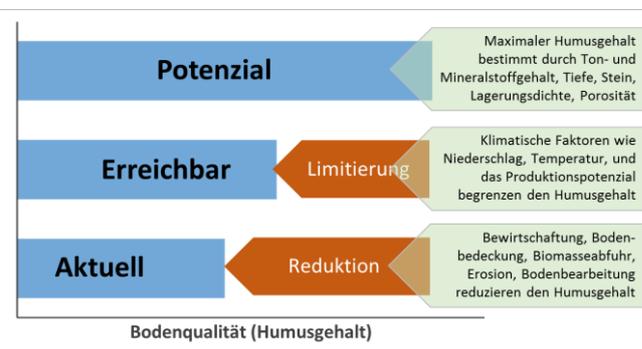


Abb. 3: Faktoren, welche den Humusgehalt beeinflussen (nach Ingram and Fernandes (2001))

Bodenbearbeitung bricht Aggregate auf, in denen Humus geschützt ist, und beschleunigt dessen Mineralisierung durch die Mikroorganismen. Wegen der mangelnden Begrünung gelangen weniger Assimilate aus der Photosynthese in den Boden. Die Anbaupause bei der Kultivierung annueller Pflanzen ist ein Grund dafür, dass Ackerböden weniger Humus als Grünlandböden aufweisen.

2. Bedeutung des Humus für Bodenfunktionen und Ökosystemdienstleistungen

Die umfassende Rolle des Humus für die Bodenfunktionen bestimmt ihre Bedeutung für die Ökosystemdienstleistungen des Bodens. In Bodenqualitätskonzepten werden weltweit eine Vielzahl von Indikatoren genannt. Der Humus nimmt aber eine zentrale Stellung ein (Abb. 4).

Zahlreiche Ansätze, Ackerbausysteme nachhaltiger zu gestalten, verfolgen das Ziel den Humusgehalt der Böden zu erhöhen. In der konservierenden Landwirtschaft und im biologischen Landbau sind Pakete von Einzelmassnahmen verankert, die einen positiven

Einfluss auf den Humusgehalt und die damit assoziierten Bodenfunktionen haben (Fließbach et al., 2007; Gattinger et al., 2012; Cooper et al., 2016; Bai et al., 2018). Diese Massnahmenpakete sind bisher nicht in der Lage, die Leistung natürlicher Ökosysteme zu erreichen, denn offenbar gehen die Ansätze nicht weit genug. Dennoch kann durch die Bodenbewirtschaftung je nach Bodentextur (Korngrößenverteilung) und Klima (Temperatur, Niederschlag) eine gewisse Humuszunahme erreicht werden. Über den rein agronomischen Nutzen hinaus ist mit einer Zunahme der C-Vorräte um wenige Zehntel Prozentpunkte ein grosses Ziel für den Klimaschutz erreicht (siehe www.4p1000.org). Mit nur 0.4% jährlicher Steigerung der Humusvorräte weltweit liesse sich der Anstieg der vom Menschen verursachten CO₂-Emissionen ausgleichen. Eine Humus-mehrende Landwirtschaft hat also nicht nur lokal und regional positive Auswirkungen, sondern ist auch wirksam auf globaler Ebene wo sie helfen kann Klimaschutzziele zu erreichen.

Die Gesellschaft hat ein Interesse daran, dass der Boden so genutzt wird, dass seine Funktionen sowie jene angrenzender Ökosysteme nicht belastet werden. Die meisten Bodenfunktionen und auch die Produktivität des Ackerbaus werden durch Humus beein-

flusst. So liegt das gemeinsame Interesse von Bodennutzern und der Gesellschaft auf der Hand um das Potenzial der Böden für die Zukunft zu sichern.

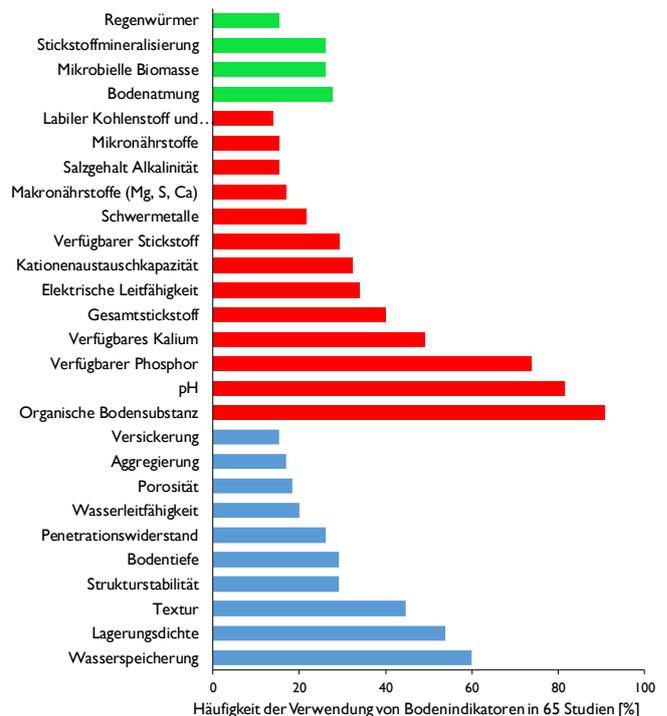


Abb. 4: Häufigkeit der Verwendung von Indikatoren zur Bewertung der Bodenqualität (Bünemann *et al.*, 2018)

3. Geltende Regelungen für Boden

In der Schweiz ist der Schutz der Böden einerseits im Rahmen der Umweltschutzgesetzgebung (USG und VBBö) geregelt. Andererseits zielt die Direktzahlungsverordnung im Landwirtschaftsgesetz darauf ab Landwirten einen Anreiz zu bieten nachhaltig zu produzieren.

3.1 Die Verordnung über Belastungen des Bodens (VBBö)

Boden gilt als fruchtbar, wenn:

- die biologisch aktive Lebensgemeinschaft, die Bodenstruktur, der Bodenaufbau und die Mächtigkeit für seinen Standort typisch sind und er eine ungestörte Abbaufähigkeit aufweist;
- natürliche und vom Menschen beeinflusste Pflanzen und Pflanzengesellschaften ungestört wachsen und sich entwickeln können und ihre charakteristischen Eigenschaften nicht beeinträchtigt werden;
- die pflanzlichen Erzeugnisse eine gute Qualität aufweisen und die Gesundheit von Menschen und Tieren nicht gefährden;
- Menschen und Tiere, die ihn direkt aufnehmen, nicht gefährdet werden.

Die Verordnung über Belastungen des Bodens (VBBö-OSol, 1998) definiert einen fruchtbaren Boden.

Dort sind Richt-, Prüf- und Sanierungswerte für potentiell toxische Schwermetalle, organische Kontaminationen und Richtwerte für Erosion genannt, bei deren Überschreitung Handlungsbedarf seitens des Bodenschutzes entsteht. Diese Verordnung enthält bisher keine Angaben zu standorttypischen Humusgehalten oder einer unteren Gehaltsgrenze, bei der die Funktionalität des Bodens gefährdet ist.

3.2 Ökologischer Leistungsnachweis und Direktzahlungsverordnung

Im Regelwerk des ökologischen Leistungsnachweises (ÖLN) ist die Verpflichtung enthalten, den Boden eines Feldes alle 10 Jahre auf pH, P, K und auch den Humusgehalt untersuchen zu lassen. Für Spezialkulturen (Gemüse) und Labels (z.B. Knospe) gelten zum Teil kürzere Intervalle, meist aber nur für die Nährstoffgehalte. Während pH, P und K analytisch gemessen werden wird für den Humus derzeit noch eine «Fühlprobe» akzeptiert. Diese ist eine Schätzmethode die keine genauen Daten liefert um die Wirkung von Bewirtschaftungsänderungen zu erkennen. Die Messwerte werden ausserdem nur in einzelnen Kantonen systematisch mit den Koordinaten des Feldes

gesammelt. Das zuständige Bundesamt erhält zwar die Daten aus allen Kantonen, allerdings ohne die Angabe der geografischen Koordinaten des Feldes, sondern nur mit der Postleitzahl des Betriebes. Im internationalen Vergleich ist die Verpflichtung der Landwirte den Boden regelmässig analysieren eine beispielhafte Regulierung. Dass diese Analysen aufgrund der Vertraulichkeit nicht ausgewertet werden ist aber paradox. Das regulatorische und wissenschaftliche Potenzial dieser Daten ist sehr gross und daher sollten sie ausgewertet werden zum Beispiel für die Erfolgskontrolle der ÖLN-Massnahmen. Steuerzahlende erwarten einen ökologischen Mehrwert durch Direktzahlungen an Landwirte und können davon ein Recht ableiten zu erfahren, was damit erreicht worden ist.

3.3 Humus-Referenzwerte und Bodenqualitätskonzepte in anderen Ländern

Bisher gibt es keine Rechtsgrundlage in der Schweiz, Europa oder weltweit, die einen Zielwert für den Humusgehalt des Bodens vorgibt. Dafür ist die Heterogenität der Gehalte innerhalb eines Feldes und die Standortabhängigkeit zu gross. Es gibt aber einige bereits angewendete Ansätze zur Bodenbewertung und Definition standorttypischer Humusgehalte, die sich an den folgenden drei Konzepten orientieren.

Normalverteilung: Viele Konzepte bedienen sich der Verteilung der gemessenen Werte und leiten daraus stochastisch ermittelte Erwartungswerte ab. Es wird dann bewertet, ob der fragliche Boden innerhalb einer vorab definierten Bandbreite der Variabilität liegt. Die vorherige Bewirtschaftung des Bodens hat den Humusgehalt aber bereits verändert. Daher ist der häufigste oder mittlere Wert einer Grundgesamtheit an Böden nicht per se der optimale Wert oder Zielwert. Wessolek *et al.* (2008) kommen zu dem Schluss, dass man aufgrund der hohen geo-klimatisch bedingten Heterogenität von Böden keinen idealen Humusgehalt für Böden festlegen kann. Capriel (2010) hat die Abhängigkeit des Humusgehalts von Standortparametern (Tongehalt, Niederschlag) und

der Landnutzung in einer Studie mit hoher Standort- und Probenanzahl in Bayern aufgezeigt. Die Bodenbewirtschaftung hat laut dieser Studie einen geringen Einfluss, obwohl die Einführung von organischer Düngung (Gattinger *et al.*, 2012), reduzierter Bodenbearbeitung (Cooper *et al.*, 2016) und Fruchtfolgen (Bai *et al.*, 2018) sich nachweislich positiv auf Humusgehalte auswirken. Die Ermittlung von Erwartungswerten ist ein bewährtes Konzept zur Entdeckung von Ausreissern oder Extremwerten (Vollzug Bodenbiologie, 2009). Das wohl umfangreichste Programm zur Bodenqualitätsbewertung ist die «Comprehensive Assessment of Soil Health» (CASH) welches mittlerweile auf einer Datenbasis von mehr als 10'000 Bodenbewertungen und 60% der Ackerfläche der USA beruht (Moebius-Clune, 2016). Ein ähnliches Bewertungsmodell mit normativem Ansatz (Sindi) wurde in Neuseeland erarbeitet (Lilburne *et al.*, 2004).

Referenzstandort: Da der ursprüngliche Humusgehalt eines Ackerbodens unbekannt ist und seine Eigenschaften durch natürliche oder anthropogene Einflüsse verändert sein können, ist man auf Vergleichswerte und Referenzen zu anderen Standorten angewiesen. Für Acker, Wald und Moorböden müssen gegebenenfalls separate Referenzwerte ermittelt werden, die geologisch und klimatisch vergleichbar sind. Ob ein solcher Standort gut bewirtschaftet worden ist und einen Idealwert widerspiegelt, wird von Experten beurteilt. Inwiefern ein Boden das Ziel erreicht hat, welches vom Referenzstandort vorgegeben wurde, ist der Bewertungsmassstab. Das Ökosystemprofil welches in den Niederlanden von Rutgers *et al.* (2008) eingeführt wurde, fusst auf dem Vergleich zu Referenzstandorten, die von einem Expertenkonsortium und durch eine Vielzahl von Analysen als qualitativ gut bewertet wurden.

Funktionalität: Die drei biologischen Funktionen des Bodens (Abb. 1) sind eine Richtschnur für die Erwartungen an dieses Konzept welches bislang noch nicht implementiert ist, da sich Bodenfunktionen nicht vollumfänglich messen lassen. Im Kapitel 5.2. beschreiben wir ein jüngst publiziertes Konzept, das dieser Idee sehr nah kommt.

4. Messung des Humusgehalts

Die Messung des Humusgehalts setzt sich zusammen aus der Auswahl der repräsentativen Fläche eines Feldes, der Aufbereitung der Bodenprobe und der Messung der homogenisierten Probe. Grundlage für eine korrekte Bestimmung des Humusgehalts ist eine standardisierte und korrekte Probenahme. Sie muss

der Heterogenität des Feldes gerecht werden und auch die vertikale Schichtung des Bodens berücksichtigen. Es kann notwendig sein, mehr als eine Bodenprobe zu nehmen, wenn das Feld zu inhomogen erscheint.

4.1 Probenahme

Die **räumliche Variabilität** eines Feldes hängt zusammen mit der Geologie des Standortes, mit seiner Topografie, welche die historischen Erosions- und Ablagerungsereignisse abbildet, mit der früheren und aktuellen Landnutzung und den damit verbundenen Landschaftselementen (z. B. Gewässer, Grundwasser, Hecken und Feldgehölze, Wege), die zum Teil schwer erkennbar sind. Der langjährige Bewirtschafter kennt die homogenen Teilflächen aus Erfahrung, es sind Zonen mit ähnlicher Wasserführung und Wachstumsdynamik und letztlich ähnlichem Ertrag. Die Feldränder sind im Vorgewende verdichtet, Kuppenlagen erodiert, am Hangfuss oder in Mulden sammelt sich erodiertes Material.

Die **zeitliche Dynamik** des Auf- und Abbaus der Biomasse und ihr Eintrag in den Boden muss ebenfalls berücksichtigt werden. Oft wird ein Termin im zeitigen Frühjahr empfohlen, da zu diesem Zeitpunkt der Boden mehrere Monate ungestört war und die Bewirtschaftungsmassnahmen zu Vegetationsbeginn noch nicht durchgeführt worden waren. In der Landwirtschaft wird nach der Ernte beprobt um die Nährstoffsituation für die Folgekultur zu bewerten.

Viele Studien kommen zum Schluss, dass **Zeitintervalle** von 10 Jahren ausreichen um Veränderungen im Humusgehalt des Bodens nach einer Bewirtschaftungsänderung zu messen (Post and Kwon, 2000; Post *et al.*, 2001; Saby *et al.*, 2008; Capriel, 2010).

Die **Bodenschicht**, aus der die Bodenprobe stammt, orientiert sich auf Ackerflächen meist an der Bearbeitungstiefe für die Grundbodenbearbeitung. In der Schweiz wird eine Tiefe von 0-20 cm für Ackerböden und 0-10 cm für Grünlandböden empfohlen (von der Bodenoberfläche aus gemessen). Natürliche Standorte werden auch horizontweise charakterisiert. Für ein standardisiertes Monitoring muss das Konzept für die Probenahme (Anzahl Teilflächen, Tiefe, Zeitpunkt) zu Anfang festgelegt und beibehalten werden.

Für die Beprobung gemäss **ÖLN** bildet man eine Mischprobe aus mindestens 20 gleichmässig über die Fläche des Feldes oder der homogenen Teilfläche verteilten senkrechten Einstichen. Diese Art der Probenahme repräsentiert die Gesamtfläche des Feldes sehr gut (Deluz, 2017). Die zeitliche Dynamik wird besser abgebildet mit der Beprobung gemäss **NABO**. Dafür werden alle fünf Jahre von einer 10×10 m grossen Teilfläche drei Mischproben aus 25 Einstichen aus 0-20 cm Tiefe entnommen (Gubler *et al.*, 2015; Hug *et al.*, 2018).

Capriel (2010) empfiehlt mindestens 3 Teilflächen von jeweils 10 m² pro Feld festzulegen und aus jeder dieser Teilflächen eine Mischprobe zu nehmen. Im Rahmen seiner Studie zu standortgerechten Humusgehalten wurden sechs Einstiche in diesen Teilflächen separat analysiert. Die Humusgehalte liessen sich nach Bodentextur und Höhenstufe gruppieren (Tab. 2) (Capriel, 2010; Wiesmeier, 2017). Die Bedeutung des Tongehalts und des Mikroklimas für den Humusgehalt wird hier deutlich. Hassink (1997) konnte belegen, dass die mit dem Ton (<20 µm) assoziierten Humusanteile, vor dem mikrobiellen Abbau besser geschützt sind.

Tab. 2: Spannweiten standorttypischer Humusgehalte (C_{org} , N_{total}) in Abhängigkeit von Bodentextur und Höhenstufen.

Bodenart	Höhe [m]	C_{org} [%]	N_{total} [%]
leicht	< 350	0,7 - 1,4	0,06 - 0,12
	350-550	0,8 - 1,6	0,07 - 0,14
mittel	< 350	1,0 - 1,5	0,09 - 0,15
	350-550	1,1 - 2,1	0,11 - 0,19
	> 550	1,5 - 2,6	0,15 - 0,24
schwer	< 350	1,2 - 2,1	0,12 - 0,22
	350-550	1,3 - 2,6	0,13 - 0,25
	> 550	2,3 - 3,8	0,23 - 0,40

Für wissenschaftliche Zwecke bedient man sich geostatistischer Methoden zur Ermittlung der Heterogenität eines Feldes (Brus and de Gruijter, 1997).

4.2 Messmethode

Die Bodenprobe wird im Labor auf 2mm gesiebt und anschliessend getrocknet. Bestimmungsmethoden für Humus mit kleinen Einwaagen verlangen in der Regel, dass die Probe noch fein gemahlen wird.

Humus wird meist als organischer Kohlenstoff (C_{org}) gemessen. Bei einem durchschnittlichen Kohlenstoffgehalt des Humus von 58%, errechnet man den Humusgehalt indem man den gemessenen C_{org} Gehalt des Bodens mit 1.725 multipliziert. Boden kann ausserdem beträchtliche Mengen an anorganischem Kohlenstoff enthalten, der aus Karbonaten besteht, die die Humusmessung stören können.

Die Referenzmethode in der Schweiz ist noch eine nasschemische Oxidation des Humus mit Kaliumdichromat und konzentrierter Schwefelsäure (Agroscope, 1996-2018). Diese wird gegenwärtig ersetzt durch eine thermische Oxidation mit moderner Elementaranalytik (CHN-Analyse). Die thermische Oxidation misst in der Regel Kohlenstoff und Stickstoff im Verbrennungsgas. Um den organischen Kohlenstoff des Bodens mit dieser Methode zu messen, muss der anorganische Kohlenstoff separat ermittelt werden. Dafür wird der Boden entweder mit Säure

behandelt, um das CO₂ aus den Karbonaten freizusetzen oder man verbrennt zunächst die organischen Bestandteile bei Temperaturen bis 500° C und anschliessend die anorganischen bei mindestens 800° C (Blume *et al.*, 2011).

Spektroskopische Methoden zur Ermittlung des Humusgehalts werden immer häufiger eingesetzt. Sie liefern eine Fülle an Informationen über die Menge und die chemische Zusammensetzung des Humus und auch der Bodenmatrix (Reeves, 2010; Steffens *et al.*, 2014). Zudem bieten sich spektroskopische Methoden in der Labor- und Feldanalytik als auch in der Fernerkundung an.

Für eine Ermittlung der Kohlenstoffvorräte (kg ha⁻¹) wird korrekterweise eine Beprobung bis in eine Tiefe von 100 cm durchgeführt. Parallel dazu wird in allen

Tiefenstufen zusätzlich zum gravimetrischen Gehalt an Humus (g kg⁻¹), die Lagerungsdichte des Bodens (g cm⁻³) bestimmt. So erhält man unter Berücksichtigung der beprobten Bodenschicht die Menge an organischem Kohlenstoff pro Flächeneinheit.

Kommerzielle Labore in der Schweiz bieten Bodenprobenpakete für ÖLN an. Neben dem pH und Nährstoffanalysen ist darin standardmässig eine Fühlprobe für Ton, Schluff und Humus enthalten, die keine präzisen Resultate liefert. Die Körnung aus Ton, Schluff und Sand ist sehr stabil und sollte einmal pro Standort gemessen werden. Wenn man an den Veränderungen des Humusgehalts nach einer Bewirtschaftungsänderung interessiert ist, ist die Fühlprobe ungeeignet, denn dafür ist sie zu ungenau.

5. Weg zu einem Referenzwert für Humus

Die VBBio (Vollzug BodenBiologie) ist ein Zusammenschluss der Bodenschutzfachstellen des Bundes inkl. NABO und der Kantone sowie Vertreterinnen der Forschung. Deren Ziel ist es Methoden der Bodenbiologie im Bodenschutzvollzug einzusetzen. Die VBBio und auch andere Fachgruppen des CercleSol sind daran interessiert zu prüfen ob ein Referenzwert für den Humusgehalt im Boden festgelegt werden kann, der wissenschaftlichen Kriterien standhält, aus der Sicht der Praxis akzeptabel und im Rahmen des Bodenschutzes vollziehbar ist. Für die Bodennutzer wäre es zudem wichtig zu wissen, welcher Humusgehalt des Bodens als Zielgrösse anzustreben ist. Da alle Nutzerinnen des Bodens aufgefordert sind, nicht nur landwirtschaftliche Produkte zu liefern, sondern dabei auch auf die Umwelt zu achten, ist es unabdingbar, dass die Methoden und anzustrebenden Ziele definiert werden. Eine korrekte Bodenanalyse schafft Vertrauen in die Analytik und erlaubt fundierte Entscheidungen und eine gute Beratung.

5.1 Normativer Ansatz: ÖLN-Daten

Mit der Direktzahlungsverordnung und den Weisungen des ÖLN zu Bodenanalysen hat die Schweiz ein System geschaffen, welches einzigartig ist. Formal fehlt für ein flächendeckendes Monitoring der Kohlenstoffvorräte im Boden auf Basis der ÖLN Daten nur der kleine Schritt, dass die Analysen für die Bundesadministration verfügbar gemacht werden. Das Nutzenpotenzial dieser Daten für statistische Zwecke ist immens. Sie wären nützlich für die Bewertung des ÖLN und der DZV und erzeugen den nötigen Hin-

tergrund an Daten um die Rolle des fruchtbaren Bodens (VBBio) für die Umwelt und das Klima zu untermauern. Um die Qualität der Bodendaten zu verbessern sollten die Vorschläge aus Kapitel 4 berücksichtigt werden damit die Probe repräsentativ ist und die Messung korrekt erfolgt.

Wenn Böden durch ihre heutige oder frühere Nutzung bereits verarmt sind besteht die Gefahr, dass ein «normativer» Ansatz zu tiefe Werte als Norm liefert. Ein normativer Datensatz braucht daher zu seiner Bewertung eine Zielvorgabe – einen Referenzwert. Der Weg dahin ist vielschichtig, denn er muss nicht nur eine präzise und belastbare Bewertung ins Auge fassen, sondern auch die jeweiligen Interessen der Bodennutzer und ihrer Vertreter (Bünemann *et al.*, 2018). So sind die Vorbehalte der Landwirtinnen oder des Bauernverbands bezüglich der Freigabe von Bodenanalysen für die Bundesämter ein Zeichen dafür, dass mit Widerstand zu rechnen ist. Eine Referenz sollte dem Vergleich dienen und eine Bewertung der Analyse für ein Feld erlauben. Angaben über den Standort, seine Bewirtschaftung, der Tongehalt des Bodens können den rein «normativen» Referenzwert interpretierbar machen. Die Humusbilanz kann ergänzende Daten dazu liefern, denn sie bilanziert die Stoffflüsse zum Betrieb und heraus – allerdings ohne einen direkten Flächenbezug.

5.2 Funktioneller Ansatz: Bodenstruktur

Humus ist die Drehscheibe für eine Vielzahl von Bodenfunktionen. Die Gültigkeit eines Humus-Referenzwertes anhand der Erhaltung oder Verbesserung von Bodenfunktionen zu prüfen ist daher attraktiv. Der Fokus kann auf die Habitat-Funktion, die Produktionsfunktion oder die Regulierungsfunktion gelegt werden, die zu ihrer Ermittlung jeweils eine Vielzahl von Indikatoren benötigen. Expertenwissen und geschultes Fachpersonal sind für diese Art der Bewertung notwendig. Andererseits kann eine visuelle Beurteilung der Bodenstruktur z.B. mit einer Spatenprobe (Ball *et al.*, 2017) die Brücke zwischen der Bodenanalyse im Labor mit konkreten Resultaten und der eher abstrakt definierten Bodenfunktion bilden. Johannes *et al.* (2017) haben ähnlich wie Hassink (1997) das Verhältnis von Humus zu Ton herangezogen als eine interne Bezugsgrösse, die hilft den erreichbaren Humusgehalt abzuschätzen. Dexter *et al.* (2008) definiert dieses Humusbindungspotenzial wie folgt: Sind die Tonminerale des Bodens mit Humus belegt, wird ein Massenverhältnis C_{org}/Ton von 0.1 erwartet d.h. zehn Gramm Ton binden ein Gramm C_{org} oder 1.7 Gramm Humus. Johannes *et al.* (2017) greifen zur Ermittlung des Schwellenwerts für gute Strukturqualität des Bodens auf die «Visual Estimation of Soil Structure» (VESS) nach Ball *et al.* (2007) zurück (Abb 5). Die Bewertung mit der VESS Methode ist zwar subjektiv und nicht quantitativ, aber die Person, die sie durchführt, bewertet die Struktur eines Bodenriegels in seiner Gesamtheit. Eventuell sogar mit dem Wissen des Eigentümers über die Parzelle, aus der der Bodenriegel stammt. Die Spatenprobe gibt Aufschluss über die Struktur des Bodens, seine Belebtheit (Wurzeln, Regenwürmer) und den ungestörten Abbau von Pflanzenresten. Es ist ein Bodenbewertungssystem, dessen Resultate auch mit vielen weitaus präziseren Methoden übereinstimmen (Ball *et al.*, 2017). Die systematische Datenerfassung zusammen mit einer Fotodokumentation kann den Wert dieser Methode für die Landwirtin verbessern. Der Vergleich von visuell erkennbaren Trends mit solchen aus der Bodenanalyse ist aber sowohl für den Landwirt, seine Beraterin, den Bodenschutzbeauftragten und den Wissenschaftler interessant.

Der funktionelle Ansatz von Johannes *et al.* (2017) ist neu und vielversprechend, da jeder Boden durch seinen Tongehalt ein Potenzial für Humusbindung aufweist. Alle Humusmengen die über dieses Potenzial hinausgehen sind partikuläre organische Substanz

und ein Supplement, sofern mehr Humus immer als positiv bewertet wird. Dieses Konzept ist unseres Wissens der bisher einzige Weg der Herleitung eines Richtwertes für Humus, der nicht die normative Verteilung der Humusgehalte zur Ausgangsbasis hat (Capriel, 2010).

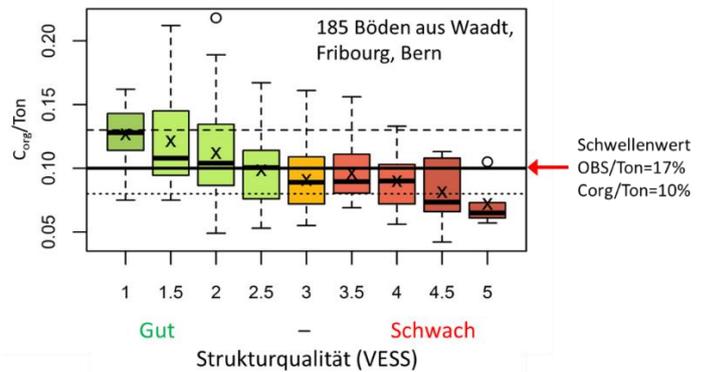


Abb. 5 Herleitung und Verifizierung des Schwellenwerts nach Boivin *et al.* (2017) anhand der Bewertung mit der «Visual Estimation of Soil Structure» (VESS) nach Ball *et al.* (2007)

Die Spatenprobe ist methodisch beschränkt auf visuell erkennbare Merkmale der Bodenstruktur. Für die Überprüfung eines Resultat-orientierten Monitoring-Ansatzes sollte im Rahmen eines Projektes die Variabilität der Spatenprobe mit der von OBS, Ton, Standort- und Bewirtschaftungsdaten in einer Modellbetrachtung verglichen werden. Dazu sollten Böden flächendeckend nach geoklimatischen und pedologischen Kriterien ausgewählt, nach vorgegebener Strategie beprobt, mit Standardmethodik auf Humus analysiert und interpretiert werden. Die Spatenprobe auf diesen Schlägen sollte im Rahmen des Pilotprojekts durch geschultes und erfahrenes Personal ausgeführt werden. Im Sinne einer Sensibilisierung kann eine autonome Bestimmung der Bodenstruktur mittels Spatenprobe die Auswirkung einer Bewirtschaftungsänderung für den Landwirt direkt erfahrbar machen und dazu beitragen, dass strengere Richtlinien eher akzeptiert und unterstützt werden.

Die Entwicklung eines Referenzwertes über die Funktionalität des Bodens ist dem normativen Ansatz vorzuziehen, da letzterer die Bodenfunktion bisher ausser Acht lässt. Der Aufwand ist zunächst recht hoch, kann autonom durch die Landwirtin ausgeführt werden. Daher erscheint die Definition eines «guten Bodens» über die Kombination von Bodenanalyse Spatenprobe als eine sinnvolle und zielführende Herangehensweise. Sie liefert nicht nur die notwendigen Kennwerte, sondern vermittelt einen sensorischen Erkenntnisgewinn für die Nutzerinnen und Nutzer des Bodens.

6. Schlussfolgerungen – Empfehlungen

Konzept zur Definition eines Referenzwerts: normativ oder funktionell

- Der funktionelle Ansatz, der Spatenprobe und Bodenanalyse auf Ton und Humus kombiniert (Johannes *et al.*, 2017), wird an vielen Standorten der Schweiz im Rahmen eines Pilotprojekts verifiziert. Dieser methodische Ansatz ist eine vielversprechende Ergänzung zum normativen Ansatz. Die Partizipation der Landwirte bei der Anwendung der Spatenprobe kann sie für die Fragen des Bodenschutzes sensibilisieren. Bund und Kantone können einen Lehrgang zum Bodenexperten für Landwirte und Berater organisieren.
- In diesem Zusammenhang ist nicht klar, welche Werte für Böden ohne Ton oder mit sehr hohen Gehalten anzunehmen wären. Untersuchungen zur Klärung dieses Sachverhalts sind notwendig.
- Abweichungen von einem «normativen» Referenzwert sind anhand der Streuung der Resultate erkennbar, wobei eine zu definierende Bandbreite als normal gilt. Stark abweichende Werte erfordern eine genauere Abklärung der Ursachen. Die Grundgesamtheit der Böden kann durch die derzeitige oder vergangene Bewirtschaftung eine zu schlechte Bodenqualität aufweisen so dass sie keinen Idealwert darstellt.

Methodik

- Humus kann in einer homogenisierten Bodenprobe mit hoher Präzision gemessen werden. Präzision und Wiederholbarkeit der Messung mit einer Standardmethode müssen regelmässig in Ringanalysen überprüft werden.
- Das Schema der Beprobung eines Feldes ist im Hinblick auf die Entnahmetiefe gemäss NABO und ÖLN definiert. Die räumliche Variabilität muss bei der Probenahme berücksichtigt werden, was bei der ÖLN Strategie nur schlecht reproduzierbar ist. Die Festlegung einer Teilfläche, welche immer wieder beprobt wird fokussiert auf die zeitliche Dynamik und lässt Inhomogenität im Feld aufgrund der Bodenentwicklung, Topografie oder anderer Phänomene ausser Acht.
- Neben dem Humusgehalt sollten - wie bisher - pH und die P- und K-Gehalte anhand von Standardmethoden ermittelt werden, sowie Daten aus der Schlagkartei der Betriebe über die Bewirtschaftung des Feldes. Zusätzlich sollte einmalig für jeden Standort der Tongehalt gemessen werden.

- Die Ermittlung des Tongehalts mit der Standardmethode ist aufwändig und daher sollte überprüft werden ob spektroskopische Messungen, die in der gleichen Probe auch Humus quantifizieren kann, praktikabel und genügend präzise sind.

Datenbasis

- Daten, die im Rahmen der DZV und ÖLN ermittelt werden, müssen korrekt analytisch bestimmt und georeferenziert den Bundesämtern verfügbar gemacht werden. Die involvierten Bundesämter sollten entsprechende Richtlinien erlassen.
- Der Bund richtet eine Datenbank mit geoklimatischen Informationen und den erhobenen Analysewerten zum Standort ein. Der Datensatz ist nützlich für die Evaluation der Direktzahlungsprogramme und kann einfließen in die Informationen, die für die Bodenkartierung benötigt werden.

Sensibilisierung

- Humus ist einer der wichtigsten Bodenqualitätsindikatoren mit agronomischer, gesellschaftlicher, Umwelt- und Klima-politischer Relevanz. Die Nutzer des Bodens und die Gesellschaft sollten in dieser Hinsicht sensibilisiert werden.
- Partizipatives Vorgehen: Der Weg zur Entwicklung eines Referenzwertes ist vielschichtig, denn er muss auch die jeweiligen Interessensvertreter miteinbeziehen.

Autoren: Andreas Fliessbach, Else Bünemann, Paul Mäder, Forschungsinstitut für Biologischen Landbau (FiBL), Frick, 11. Nov. 2020

Danksagung: Wir danken dem Bundesamt für Umwelt für die Förderung dieser Studie. Den Rednern und Teilnehmern am Workshop «Humus guidance values» sind wir sehr dankbar für ihre wertvollen Präsentationen und Diskussionsbeiträge. Ein besonderer Dank an B. Seitz, E. Havlicek, G. von Rohr, P. Weisskopf, R. Meuli, S. Burgos, H. Flaig, C. Maurer und C. Fankhauser für ihre Verbesserungsvorschläge zu einer früheren Version dieses Faktenblatts.

7. Literatur

- Agroscope, 1996-2018. Referenzmethoden der Eidgenössischen landwirtschaftlichen Forschungsanstalten - 1. Bodenuntersuchung zur Düngeberatung. Zürich-Reckenholz.
- Bai, Z., Caspari, T., Gonzalez, M.R., Batjes, N.H., Mäder, P., Bünemann, E.K., de Goede, R., Brussaard, L., Xu, M., Ferreira, C.S.S., Reintam, E., Fan, H., Mihelić, R., Glavan, M., Tóth, Z., 2018. Effects of agricultural management practices on soil quality: A review of long-term experiments for Europe and China. *Agric. Ecosys. Environ.* 265, 1-7.
- Ball, B.C., Batey, T., Munkholm, L.J., 2007. Field assessment of soil structural quality – a development of the Peerlkamp test. *Soil Use Manag.* 23, 329-337.
- Ball, B.C., Guimarães, R.M.L., Cloy, J.M., Hargreaves, P.R., Shepherd, T.G., McKenzie, B.M., 2017. Visual soil evaluation: A summary of some applications and potential developments for agriculture. *Soil Till. Res.* 173, 114-124.
- Blume, H.-P., Brümmer, G.W., Horn, R., Kandeler, E., Kögel-Knabner, I., Kretschmar, R., Stahr, K., Wilke, B.-M., 2010. Scheffer/Schachtschabel: Lehrbuch der Bodenkunde. Spektrum Akademischer Verlag.
- Blume, H.-P., Stahr, K., Leinweber, P., 2011. Bodenkundliches Praktikum. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg.
- Boivin, P., Johannes, A., Matter, A., Gondret, K., Leopizzi, S., Deluz, C., 2017. Guide values of OM content for soil protection. Presentation at the workshop: "Humus guidance values", Bern.
- Brus, D.J., de Gruijter, J.J., 1997. Random sampling or geostatistical modelling? Choosing between design-based and model-based sampling strategies for soil (with discussion). *Geoderma* 80, 1-44.
- Bünemann, E.K., Bongiorno, G., Bai, Z., Creamer, R.E., De Deyn, G., de Goede, R., Fleskens, L., Geissen, V., Kuyper, T.W., Mäder, P., Pulleman, M., Sukkel, W., van Groenigen, J.W., Brussaard, L., 2018. Soil quality – A critical review. *Soil Biol. Biochem.* 120, 105-125.
- Capriel, P., 2010. Standorttypische Humusgehalte von Ackerböden in Bayern. In: Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) (Ed.), LfL- Schriftenreihe 16, Freising-Weihenstephan, p. 46.
- Cooper, J., Baranski, M., Stewart, G., Nobel-de Lange, M., Barberi, P., Fließbach, A., Peigné, J., Berner, A., Brock, C., Casagrande, M., Crowley, O., David, C., Vliegheer, A., Döring, T.F., Dupont, A., Entz, M., Grosse, M., Haase, T., Halde, C., Hammerl, V., Huiting, H., Leithold, G., Messmer, M., Schloter, M., Sukkel, W., Heijden, M.G.A., Willekens, K., Wittwer, R., Mäder, P., 2016. Shallow non-inversion tillage in organic farming maintains crop yields and increases soil C stocks: a meta-analysis. *Agron. Sustain. Dev.* 36, 22.
- Deluz, C., 2017. Evaluation de la teneur en matière organique du sol d'une parcelle cultivée. Quel échantillonnage pour quel objectif? , Filière Agronomie. Haute École du paysage, d'ingénierie et d'architecture (hepia-GE), Genève, p. 136.
- Dexter, A.R., Richard, G., Arrouays, D., Czyż, E.A., Jolivet, C., Duval, O., 2008. Complexed organic matter controls soil physical properties. *Geoderma* 144, 620-627.
- Ehlers, K., 2015. Untergrund: Das unsichtbare Ökosystem. <https://www.boell.de/de/2015/01/08/untergrund-das-unsichtbare-oekosystem>.
- Fließbach, A., Oberholzer, H.-R., Gunst, L., Mäder, P., 2007. Soil organic matter and biological soil quality indicators after 21 years of organic and conventional farming. *Agric. Ecosys. Environ.* 118, 273-284.
- Gattinger, A., Müller, A., Haeni, M., Skinner, C., Fließbach, A., Buchmann, N., Mäder, P., Stolze, M., Smith, P., Scialabba, N.E.-H., Niggli, U., 2012. Enhanced top soil carbon stocks under organic farming. *Proc. Nat. Acad. Sci. USA* 109, 18226-18231.
- Gubler, A., Schwab, P., Wächter, D., Meuli, R.G., Keller, A., 2015. Ergebnisse der Nationalen Bodenbeobachtung (NABO) 1985-2009. Zustand und Veränderungen der anorganischen Schadstoffe und Bodenbegleitparameter. In: Bundesamt für Umwelt (Ed.), Umwelt-Zustand. NABO, Bern, p. 81.
- Guo, L.B., Gifford, R.M., 2002. Soil carbon stocks and land use change: a meta analysis. *Global Change Biol.* 8, 345-360.
- Hagedorn, F., Krause, H.-M., Studer, M., Schellenberger, A., Gattinger, A., 2018. Boden und Umwelt. Organische Bodensubstanz, Treibhausgasemissionen und physikalische Belastung von Schweizer Böden. In: SNSF (Ed.), Thematische Synthese TS2 des Nationalen Forschungsprogramms "Nachhaltige Nutzung der Ressource Boden". SNSF, Bern.
- Hassink, J., 1997. The capacity of soils to preserve organic C and N by their association with clay and silt particles. *Plant Soil* 191, 77-87.
- Hug, A.-S., Gubler, A., Gschwend, F., Widmer, F., Oberholzer, H., Frey, B., Meuli, R.G., 2018. NABObio – Bodenbiologie in der Nationalen Bodenbeobachtung - Ergebnisse 2012–2016 Handlungsempfehlungen und

- Indikatoren. In: Agroscope (Ed.), Agroscope Science. Agroscope, Zürich, p. 55.
- Ingram, J.S.I., Fernandes, E.C.M., 2001. Managing carbon sequestration in soils: concepts and terminology. *Agric. Ecosys. Environ.* 87, 111-117.
- Johannes, A., Matter, A., Schulin, R., Weisskopf, P., Baveye, P.C., Boivin, P., 2017. Optimal organic carbon values for soil structure quality of arable soils. Does clay content matter? *Geoderma* 302, 14-21.
- Kolbe, H., 2015. Leitfaden zur Humusversorgung. Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Dresden, p. 70.
- Lal, R., 2004. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science* 304, 1623-1627.
- Lal, R., 2008. Sequestration of atmospheric CO₂ in global carbon pools. *Energy & Environmental Science* 1, 86-100.
- Leifeld, J., Bassin, S., Fuhrer, J., 2005. Carbon stocks in Swiss agricultural soils predicted by land-use, soil characteristics, and altitude. *Agric. Ecosys. Environ.* 105, 255-266.
- Lilburne, L., Sparling, G., Schipper, L., 2004. Soil quality monitoring in New Zealand: development of an interpretative framework. *Agric. Ecosys. Environ.* 104, 535-544.
- Moebius-Clune, B.N., 2016. Comprehensive Assessment of Soil Health: The Cornell Framework Manual. <https://soilhealth.cals.cornell.edu/>. Cornell University.
- Post, W.M., Izaurralde, R.C., Mann, L.K., Bliss, N., 2001. Monitoring and Verifying Changes of Organic Carbon in Soil. In: Rosenberg, N.J., Izaurralde, R.C. (Eds.), *Storing Carbon in Agricultural Soils: A Multi-Purpose Environmental Strategy*. Springer Netherlands, Dordrecht, pp. 73-99.
- Post, W.M., Kwon, K.C., 2000. Soil carbon sequestration and land-use change: processes and potential. *Global Change Biol.* 6, 317-327.
- Reeves, J.B., 2010. Near- versus mid-infrared diffuse reflectance spectroscopy for soil analysis emphasizing carbon and laboratory versus on-site analysis: Where are we and what needs to be done? *Geoderma* 158, 3-14.
- Rutgers, M., Mulder, C., Schouten, A., Bloem, J., Bogte, J., Breure, A., Brussaard, L., De Goede, R., Faber, J., op Akkerhuis, G.J., 2008. Soil ecosystem profiling in the Netherlands with ten references for biological soil quality. National Institute for Public Health and the Environment (RIVM), Bilthoven NL, p. 88.
- Saby, N.P.A., Bellamy, P.H., Morvan, X., Arrouays, D., Jones, R.J.A., Verheijen, F.G.A., Kibblewhite, M.G., Verdoodt, A., Üveges, J.B., Freudenschuss, A., Simota, C., 2008. Will European soil-monitoring networks be able to detect changes in topsoil organic carbon content? *Global Change Biol.* 14, 2432-2442.
- Steffens, M., Kohlpaintner, M., Buddenbaum, H., 2014. Fine spatial resolution mapping of soil organic matter quality in a Histosol profile. *Eur. J. Soil Sci.* 65, 827-839.
- VBBio-OSol, 1998. Verordnungen über Belastungen des Bodens. Ordonnance sur les atteintes portées aux sols. In: Suisse, D.S.B.-L.C.F. (Ed.), 814.12, Bern, p. 12.
- Vollzug Bodenbiologie, V., 2009. Arbeitshilfe zur Anwendung und Interpretation bodenbiologischer Parameter. In: (VBBioSa), V.B. (Ed.), Frick.
- Wessolek, G., Kaupenjohann, M., Dominik, P., Illg, K., Schmitt, A., Zeitz, J., Gahre, F., Schulz, E., Ellerbrock, R., Utermann, J., Düwel, O., Siebner, C., 2008. Ermittlung von Optimalgehalten an organischer Substanz landwirtschaftlich genutzter Böden nach § 17 (2) Nr. 7 BBodSchG. In: Umweltbundesamt (Ed.), *Publikationen des Umweltbundesamtes*, Berlin, p. 162.
- Wiesmeier, M., 2017. Site-typical humus contents of cropland soils in Bavaria – Status quo and future challenges. Presentation at the workshop: "Humus guidance values", Berne.