

VBBio-Bulletin-BioSA Nr. 18, 2018

Humus sapiens

Cartoon by E. L. Sambourne, published in the Punch in 1882 with the sentence "Man is but a worm". This parody of Charles Darwin's concepts on the origin of humanity has been corroborated by recent molecular data on the phylogenetic relationships of annelids and vertebrates



Inhalt

1. Editorial	2
2. Ausgewählte Projekte der VBBio	3
2.1 Hintergrund, Datensicherheit, Akzeptanz und Vollzug im Rahmen der Diskussion um einen Humusreferenzwert.....	3
2.2 Projekt «Soil Food Web»	5
2.3 Praktische Übung im Labor: Bodentiere bestimmen	7
3. Forum Bodenbiologie in der Praxis	9
3.1 Organische Substanz und strukturelle Qualität des Oberbodens	9
3.2 Erkenntnisse aus fünf Jahren bodenbiologischem Monitoring der Nationalen Bodenbeobachtung und weitere Schritte für die Zukunft	16

1. Editorial

1.1 Editorial

Dominik A. Müller

Kanton Aargau, Departement Bau, Verkehr und Umwelt

Die Kantonalen Bodenschutzfachstellen und das BAFU haben 1995 die Fachgruppe Vollzug Bodenbiologie gebildet. Am 27. April 2018 traf sich die VBB in Aarau zur 50sten Sitzung seit ihrem Bestehen. Anlässlich der Jubiläumssitzung wurde die Umbenennung der VBB in VBBio beschlossen. Fortan treten wir im Rahmen des Cercle Sol als Fachgruppe VBBio auf. In den 50 Sitzungen der VBBio-Gesamtgruppe der letzten 23 Jahre haben wir eine Vielzahl von bodenbiologischen Themen diskutiert, uns über bodenbiologische Fragestellungen den Kopf zerbrochen und den Austausch zwischen Forschung und Vollzug gepflegt. Die bislang erschienen 17 VBB-Bulletins, die übrigens alle online unter www.bafu.admin.ch → Themen → Boden → Fachinformationen → Massnahmen für den Bodenschutz → Bodenbiologie verfügbar sind, zeigen unser Wirken und unsere Arbeit sehr schön auf. Auch die Bulletins erhalten ab sofort den Namen VBBio-Bulletin.

Das vorliegende VBBio-Bulletin Nummer 18 spannt den Bogen von der Vergangenheit via Gegenwart in die Zukunft. Ein für den Boden und die Bodenbiologie zentrales Thema ist der Humusgehalt der Böden. An und für sich hat jeder Boden einen für sich typischen Humusgehalt, abhängig von unter anderem dem Tongehalt. Gerade bei Ackerböden zeigt sich jedoch ein Ungleichgewicht zwischen bewirtschaftungsbedingt vorhandenem Humus und dem theoretisch zu erwartendem. Die FAO hat im Rahmen der "Koronivia joint work on agriculture" (<http://www.fao.org/climate-change/our-work/what-we-do/koronivia/en>) unter dem Stichwort "soil health" die Bedeutung des

"soil organic carbon" in Bezug auf Klimawandel und nachhaltige Bodennutzung als eines von 6 Handlungsfeldern bestimmt. Die VBBio beschäftigt sich seit längerem mit Fragen zum Humusgehalt in den Schweizer Böden. Im November 2017 trafen sich dazu 35 Personen (Vertreter der Bodenschutzfachstellen sowie Interessensvertreter aus landwirtschaftlicher Administration, Forschung, Praxis und Lehre) zu einem Workshop. Mittelfristiges Ziel ist es, einen Referenzwert für Humusgehalte in Schweizer Böden zu entwickeln. Einen funktionellen Ansatz ermöglicht das in diesem Bulletin vorgestellte Projekt STRUDEL, das, vereinfacht gesagt, einen Zusammenhang zwischen Tongehalt und Humusgehalt postuliert.

Neben der Vorstellung des Workshops für Humusreferenzwerte, der Vorstellung des Projektes STRUDEL finden Sie, geschätzte Leserin und Leser, in der 18. Ausgabe des VBBio-Bulletins Berichte zu ausgewählten Projekten der VBBio wie das Projekt "Soil Food Web" auch Erkenntnisse der Nationalen Bodenbeobachtung NABO zu den vergangenen fünf Jahren NABObio sowie einem Ausblick auf zukünftige Untersuchungsmethoden im Rahmen bodenbiologischer Fragestellungen.

Im Namen der VBBio danke ich Ihnen für Ihr Interesse an der Bodenbiologie und wünsche Ihnen eine spannende Lektüre des 18. VBBio-Bulletins.

Dominik A. Müller,
Präsident VBBio

2. Ausgewählte Projekte der VBBio

2.1 Hintergrund, Datensicherheit, Akzeptanz und Vollzug im Rahmen der Diskussion um einen Humusreferenzwert

Andreas Fliessbach

FiBL, Ackerstrasse, 5070 Frick
andreas.fliessbach@fibl.org

Die VBBio hat vorgeschlagen die Voraussetzungen und Rahmenbedingungen für einen vollzugsorientierten Referenzwert für Humusgehalte in Ackerböden abzuklären. Dieser Vorschlag wurde an einem Workshop mit 35 Teilnehmenden in Bern am 16.11.17 mit Vertretern der Bodenschutzfachstellen und Interessensvertretern aus landwirtschaftlicher Administration, Forschung, Praxis und Lehre diskutiert. Zu diesem Workshop wurden 4 Referenten eingeladen, die ihre Konzepte zur Entwicklung eines Humusreferenzwertes vorstellten und von ihren Erfahrungen in der Umsetzung berichteten.

- Else Bünemann, FiBL Frick, *Review on soil quality concepts and the importance of soil organic matter* (Bünemann et al. 2018)
- Martin Wiesmeier, LFL Freising, *Site-typical humus contents of cropland soils in Bavaria - Status quo and future challenges*
- Holger Flaig, LTZ Augustenberg, *Humus contents of arable soils in the context of cross compliance, balancing, and target values - the discussion in Baden-Württemberg*
- Pascal Boivin, hepia Genf, *Guide values of organic matter content for soil protection. Sampling requirements and related issues*

Alle Beiträge bestätigten die herausragende Rolle des Humus als Indikator für Bodenqualität. Neben dem Humusgehalt des Bodens sind in allen vorgestellten Konzepten

der Tongehalt und geoklimatische Bedingungen enthalten. Die vorgestellten Konzepte lassen sich aber unterscheiden nach der Vorgehensweise zur Bildung eines Referenzwertes. 5% der Böden im bayrischen Monitoring unterschreiten den Grenzwert von 1% C_{org}, den Jones *et al.* (2012) in ihrem Bericht zum Status der Böden in Europa vorgeschlagen haben (Abb. 1).

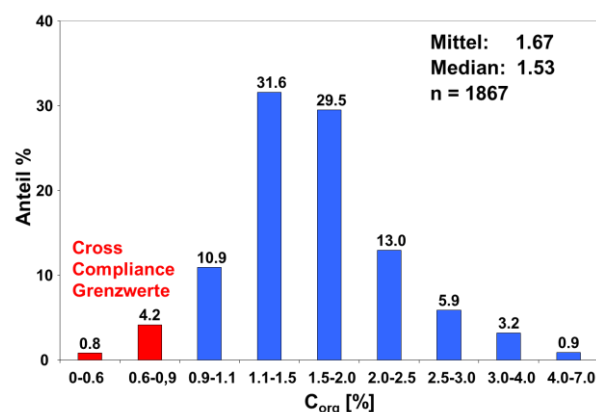


Abbildung 1. Häufigkeitsverteilung der gemessenen Humusgehalte in Bayern (Wiesmeier, 2017)

Die Konzepte aus Bayern und Baden-Württemberg definieren ihren Richtwert anhand von einer grossen Datenbasis aus Dauerbeobachtungsprogrammen. Daraus wurden Bandbreiten für Humusgehalte in Böden in Abhängigkeit von Tongehalt und Höhenlage (oder Niederschlag und Temperatur) definiert (Abb. 2). Dieser Ansatz wird als normativ bezeichnet, da er von einem Status quo durchschnittlicher Humusgehalte ausgeht. Diese können allerdings durch die heutige oder frühere Bewirtschaftung nicht dem Wert entsprechen, der geeignet wäre die Bodenfunktionen aufrechtzuerhalten. Pascal Boivin hat einen funktionellen Ansatz zur Ermittlung eines Referenzwertes

für Humus vorgestellt, welcher auf einer Auswahl von Böden der West-Schweiz beruht (vgl. Kapitel 3.1). Dieser beinhaltet zunächst eine Bewertung des Bodens im Hinblick auf seine Struktur anhand der Spatenprobe. Beim Vergleich dieser Bewertung mit Humus- und Tongehalten konnte eine enge Beziehung zwischen dem C_{org} -zu-Ton Verhältnis und der Strukturqualität des Bodens ermittelt werden (siehe Kapitel 3.1, Fig 13).

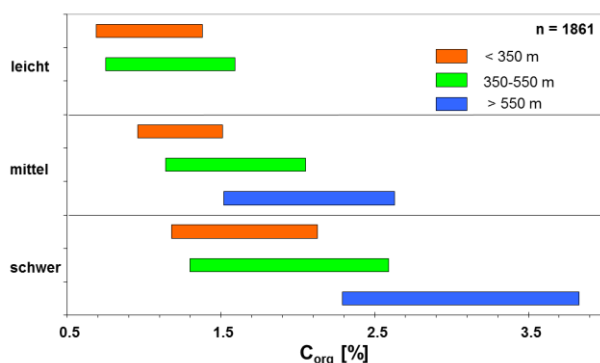


Abbildung 2. Bandbreiten der organischen C-Gehalte gruppiert nach Höhenstufe und «Bodentyp» in den Böden des Bayrischen Monitoring-Programms (Wiesmeier, 2017)

Die globale Bodenqualität nur anhand der Spatenprobe zu bewerten mag nicht ausreichend sein, da diese Methode zwar viele Bodenfunktionen anspricht, aber auf visuellen Merkmalen mit qualitativem Charakter beruht. In einem Konzept, das in den Niederlanden eingesetzt wird, beurteilen Experten einen Standort und wählen für geoklimatische Regionen einen Boden als Referenzstandort aus, der mit den anderen Böden der Region verglichen werden kann (Rutgers et al. 2008). Dieses Konzept lässt sich gut kommunizieren, da ein konkreter Bezug zu einem Boden besteht, der gemäss Experteneinschätzung all seine Funktionen erfüllt. Es eignet sich auch zur Ableitung und Verifizierung eines Indikators, der auf einer grossen Bandbreite von Böden ermittelt wird. Der Bezug zur Funktionalität jedes Bodens beruht jedoch nur auf der Gültigkeit des Indikators. Idealerweise würde an jedem Standort überprüft ob der Indikator, die gleiche Dynamik anzeigt, wie eine Charakterisierung des Bodens anhand einer

Methode, die die Bodenfunktion direkt anspricht. Mit der Spatenprobe, die autonom vom Landwirt ausgeführt werden kann, wäre ein solcher Vergleich möglich. Angesichts der Schwierigkeit einen Referenzwert für Humus zu definieren sind in Deutschland viele Regulierungsbemühungen gescheitert und man begnügt sich mit der Ermittlung der Humusbilanz eines Betriebes. Dieser zeigt an ob ein landwirtschaftlicher Betrieb einen Humusüberschuss oder ein Defizit aufweist. Allerdings lassen sich keine georeferenzierten Aussagen treffen für einen spezifischen Standort. Für ein normatives Konzept zur Ermittlung eines Referenzwertes in der Schweiz spricht, dass anfangs nur ein administrativer Schritt zur Änderung der Regelungen im Rahmen der Direktzahlungsverordnung benötigt wird, die bereits eine Bodenanalyse alle zehn Jahre vorschreibt. Dieser Schritt beinhaltet, dass Bodenanalysen mit Georeferenz zur weiteren Auswertung verfügbar gemacht werden. Die Änderungen der DZV sollten dann beinhalten, dass die Bodenprobe korrekt entnommen und analysiert wird und die Analyseresultate mit einer Georeferenz den Bundesstellen zur Verfügung gestellt werden. Der letzte Punkt ist wahrscheinlich etwas schwieriger durchzusetzen, da der Boden ein Privateigentum ist. Für ein funktionelles Konzept spricht, dass der an einem Standort ermittelte Humusgehalt anhand einer gleichzeitig durchgeführten visuellen Charakterisierung des Bodens mit Hilfe der Spatenprobe in seiner Aussagefähigkeit bewertet werden kann. Die Bewertung der Struktur des Bodens ist nicht nur für den Landwirt, der seine Bewirtschaftung anpassen kann, sondern auch für die Weiterentwicklung des Humus-Referenzwertkonzepts. Sowohl der normative wie auch der funktionelle Ansatz erlauben den Vergleich zu regional ausgewählten Referenzstandorten, die der kontinuierlichen Überprüfung dienen.

Grundsätzlich sind die folgenden Bedingungen für ein flächendeckendes Monitoring zu beachten:

- Die Probenahme im Feld muss eine homogene Fläche bis zu einer einheitlichen Tiefe von 20 cm repräsentieren. Teilflächen müssen gegebenenfalls separat beprobt werden.
- Die Bodenanalyse muss gemäss standardisierter Referenzmethoden durchgeführt werden.
- Die erhobenen Daten werden mit Georeferenz in einer Datenbank abgelegt und stehen für einen Abgleich mit anderen Flächenstatistiken zur Verfügung.

Diese Datenbank wäre ein geeignetes Instrument um Massnahmen einzuleiten, wenn ein Boden Anzeichen für eine Gefährdung zeigt. Zusammen mit Angaben aus der Schlagkartei des Betriebes und gegebenenfalls der Spatenprobe kann der Landwirt sein Ackerbausystem und der Bund die Effektivität der Direktzahlungsprogramme für das Kompartiment Boden bewerten.

2.2 Projekt «Soil Food Web»

Claudia Maurer-Troxler

Amt für Landwirtschaft und Natur des Kantons Bern

Beat Frey

Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald Schnee und Landschaft

Ausgangslage und Ziel

Trotz der anerkannten Bedeutung der Bodenlebewesen für zahlreiche Bodenfunktionen bleibt ein Grossteil der Bodenorganismen bezüglich Verbreitung und ökologischen Funktionen unbekannt. Dies hat einerseits mit der enormen Vielfalt zu tun – man schätzt, nur für die Bakterien, etwa 1 Billion Arten weltweit – und andererseits mit der Schwierigkeit, diese zu bestimmen bzw. im Labor zu kultivieren.

Dank der enormen Entwicklung in der molekulargenetischen Sequenzier- und Computertechnologie zur Entschlüsselung des Erbguts von Bodenmikroorganismen wird es heute möglich, diese komplexen mikrobiel-

Literatur

- 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 Biology and Biochemistry* 120, 105-125.
- Rutgers, M., Mulder, C., Schouten, A.J., 2008. Soil ecosystem profiling in the Netherlands with ten references for biological soil quality. National Institute for Public Health and the Environment (RIVM).
- Wiesmeier, M., 2017. Site-typical humus contents of cropland soils in Bavaria – Status quo and future challenges. *Humus guidance values*, Berne.
- Jones, A., Panagos, P., Barcelo, S., Bouraoui, F., Bosco, C., Dewitte, O., Gardi, C., Erhard, M., Hervás, J., Hiederer, R., Jeffery, S., Lükewille, A., Marmo, L., Montanarella, L., Olazábal, C., Petersen, J.-E., Pentzek, V., Strassburger, T., Tóth, G., van den Eeckhaut, M., Liedekerke, M.v., Verheijen, F., Viestova, E., Yigini, Y., 2012. The State of Soil in Europe - A contribution of the JRC to the European Environment Agency's Environment State and Outlook Report - SOER 2010. In: European Commission (Ed.), JRC Reference report, Luxembourg.

len Gemeinschaften in einer hohen Auflösung zu erfassen. Dazu werden die gewonnenen genetischen Profile mit bereits vorhandenen und bekannten Daten aus Vergleichsdatenbanken abgeglichen. Diese sind aber selbst für Mikroorganismen noch sehr lückenhaft, für Bodentiere fehlen sie weitgehend. Für eine nachhaltige Land- und Forstwirtschaft brauchen wir fundiertes Wissen über die Diversität des Bodenlebens und über Einflüsse durch Umweltveränderungen. Heute kann aufgrund der aus dem Boden extrahierten DNS die Wirkung gewisser menschlicher Aktivitäten in Land- und Forstwirtschaft auf die Zusammensetzung der mikrobiellen Lebensgemeinschaften

nachgewiesen werden. Molekularbiologische Analysen können in Zukunft einen wesentlichen Beitrag dazu leisten, Umweltveränderungen zu erkennen, den Erfolg von Bewirtschaftungsmassnahmen zu messen oder spezifische nützliche Arten gezielt zu fördern; das hochkomplexe System Boden kann vertieft biologisch erfasst und überwacht werden.

Die VBBio will mit dem Projekt Soil Food Web dazu beitragen, insbesondere von Bodentieren genetische Vergleichsdaten zu erheben. Dazu sollen die Tiere am Standort „Kocherpark“ (VBBio 2015) soweit möglich auf Artniveau bestimmt und molekulargenetisch analysiert werden.

Probenahmen

Am 22. März 2017 wurden im „Kocherpark“ je zwei Bodenproben von der WIESE und dem WALD aus 0-10 cm entnommen. Am 24. März wurde ausserdem eine grosse Menge Streu vom WALD für den Praxistag (vgl. Kapitel 2.2) eingesammelt. Anschliessend wurde von den Bodenproben je 30 g für die molekulargenetischen Analysen separiert, von der restlichen Menge wurden mit dem McFadyen-Apparat am FiBL die Arthropoden ausgetrieben bzw. die Nematoden ausgeschlämmt. Die Streuproben wurden mit der Berlese-Apparatur an der HAFL ausgetrieben.

Am 2.10.2017 wurden zusätzlich an beiden Stellen je drei Regenwürmerhebungen mit Formalin durchgeführt. Alle gewonnenen Tiere wurden in reinem Ethanol aufbewahrt.

Analysen

Die Tiere aus den Streu- und Bodenproben sowie die Regenwürmer wurden unter dem Stereomikroskop soweit möglich nach Gruppen/Gattungen/Arten bestimmt und in kleine Gefässe abgefüllt. Für die molekulargenetischen Analysen wurden die nach Gruppen sortierten Proben vom Ethanol gewaschen, homogenisiert und daraus die DNS extrahiert. Von den Bodenproben wurden zehn Gramm entnommen und die gesamte darin enthaltene DNS (Metagenom) extrahiert.

Danach wird aus der extrahierten DNS (von Bodentieren und dem Boden-Metagenom) ein zur Identifikation geeigneter Genomabschnitt isoliert. Die isolierten DNS Abschnitte, die bestimmten Zielorganismen entsprechen, werden mittels Polymerase-Kettenreaktion vermehrt und auf Hochleistungs-Sequenziergeräten sequenziert (DNS-Metabarcoding). Die gefundenen DNS-Sequenzen (Barcodes) werden in einer genetischen Vergleichsdatenbank abgelegt. Die Resultate des DNS Metabarcoding können nun mit den klassischen Bestimmungsmethoden, basierend auf der Morphologie und den DNS Vergleichsequenzen, verglichen werden.



Abbildung 3. Probenahme mit Teilnehmenden der VBBio im Kocherpark, Bern.

Ausblick

Diese Pilotstudie soll helfen, eine erste genetische Referenzbibliothek der Bodenfauna in der Schweiz aufzubauen. Das DNS Metabarcoding der Bodenfauna wird in Zukunft zahlreiche Bereiche der Biodiversitätsforschung im Boden betreffen, da zeit- und kostenintensives Sammeln, Sortieren und Bestimmen weitestgehend entfallen oder automatisiert werden können. Allerdings können die gefundenen DNS-Sequenzen (Barcodes) nur zu einer Art zugeordnet werden, wenn diese zuvor in der Referenzdatenbank erfasst wurde. Da einige Bodentiergattungen nicht auf die Standardprotokolle des Barcoding ansprechen, sollen Amplifizierungsprotokolle für erfolgreiche Sequenzanalysen verbessert werden. Dazu ist es notwendig, Strategien zur effizienten Erzeugung und wissenschaftlichen Anwendung von DNS-Barcodes zu entwickeln.

2.3 Praktische Übung im Labor: Bodentiere bestimmen

Claudia Maurer-Troxler

Amt für Landwirtschaft und Natur des Kantons Bern
claudia.maurer@vol.be.ch



Abbildung 4. Milbe



Abbildung 5. Tausendfüssler

Die Mitglieder der VBBio trafen sich anlässlich der Frühlingssitzung am 28. März 2017 zu einer praktischen Übung an der Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebenswissenschaften HAFL in Zollikofen. Thema war das Kennenlernen von Bodentieren.



Abbildung 6. Springschwanz

Nach einem Einführungsvortrag mit Informationen über Funktion und Biologie der

verschiedenen Gruppen konnten die Teilnehmenden lebende Tiere unter dem Binokular betrachten und bestimmen lernen.



Abbildung 7. Maikäferlarve (Engerling)

Die im Rahmen des VBBio-Projekts „Soil Food Web“ (vgl. Kapitel 2.1) im Kocherpark aus der Streu extrahierten Kleinlebewesen zeigten eine vielfältige, sonst kaum sichtbare und auch für Bodenfachleute oft unbekannte Welt: Urinsekten der Gruppe Springchwänze in unterschiedlichen Grössen – stark pigmentierte, behaarte Formen mit langen Beinen und Fühlern sowie grossen Augen, aber auch kleinere weisse Formen mit stark reduzierter Sprunggabel; Milben in den verschiedensten Formen - kugelig glänzend oder flach rund, räuberisch lebend und schnell unterwegs oder träge an Detritus fressend; Tausendfüssler mit einem oder zwei Beinpaaren pro Körpersegment, Spinnen, Schnecken, Asseln, Käfer und ihre Larven, Fliegenmaden und Pseudoskorpione.



Abbildung 8. Pseudoskorpion

Die enorme Formen- und Farbenvielfalt liess staunen, das grobe Bestimmen der einzelnen Gruppen verlangte eine gute Beobachtungsgabe und führte zu angeregten Diskussionen unter den Teilnehmenden.



Abbildung 9. Laufkäfer



Abbildung 10. Raubmilbe



Abbildung 11. Asseln

3. Forum Bodenbiologie in der Praxis

3.1 Organische Substanz und strukturelle Qualität des Oberbodens

Alice Johannes¹, Peter Weisskopf

Agroscope, Forschungsgruppe Bodenfruchtbarkeit und Bodenschutz
Reckenholzstrasse 191, 8046 Zürich

Pascal Boivin

¹hepia-inTNE
Agronomie, groupe Sols et Substrats
150 route de Presinge, 1254 Jussy-Genève

Mit der Verbreitung der «modernen» Landwirtschaft in der zweiten Hälfte des 20sten Jahrhunderts erhielt das Dreigespann Mineraldünger – Pestizide – Pflügen einen dominierenden Platz in der landwirtschaftlichen Produktion. Geringe Beachtung fand hingegen die Qualität des Bodens, der im Wesentlichen als «Unterlage» betrachtet wurde. Besonders die physikalische Bodenqualität wurde stark vernachlässigt. Heute wird der Verlust an Bodenqualität als äusserst alarmierend eingestuft und häufig mit dem Defizit an organischer Substanz (OS) in Verbindung gebracht. Tatsächlich ist der Gehalt an OS oder organischem Kohlenstoff (Corg) bestimmend für die Mehrheit der Bodeneigenschaften und -funktionen, etwa für

physikalische Eigenschaften wie Luftgehalt, Wassergehalt, Porosität und strukturelle Stabilität (Kay, 1998) sowie für die damit verbundenen Transport-, Belüftungs- und Retentionsprozesse. Die Untersuchung von Dexter et al. (2008) anhand von Datenbanken über Böden in Frankreich und Polen zeigte mit frappierender Deutlichkeit, dass der Anteil an Corg bei einem Corg-Ton-Verhältnis von 10 % ($OS = Corg \times 1.725$: OS/Ton von 17 %), dem höchsten statistischen Bestimmtheitsmass der Korrelation physikalischer Eigenschaften mit Corg entspricht. Die Autoren schliessen daraus, dass dieses Verhältnis der Komplexbildungskapazität von OS mit Ton entspricht.

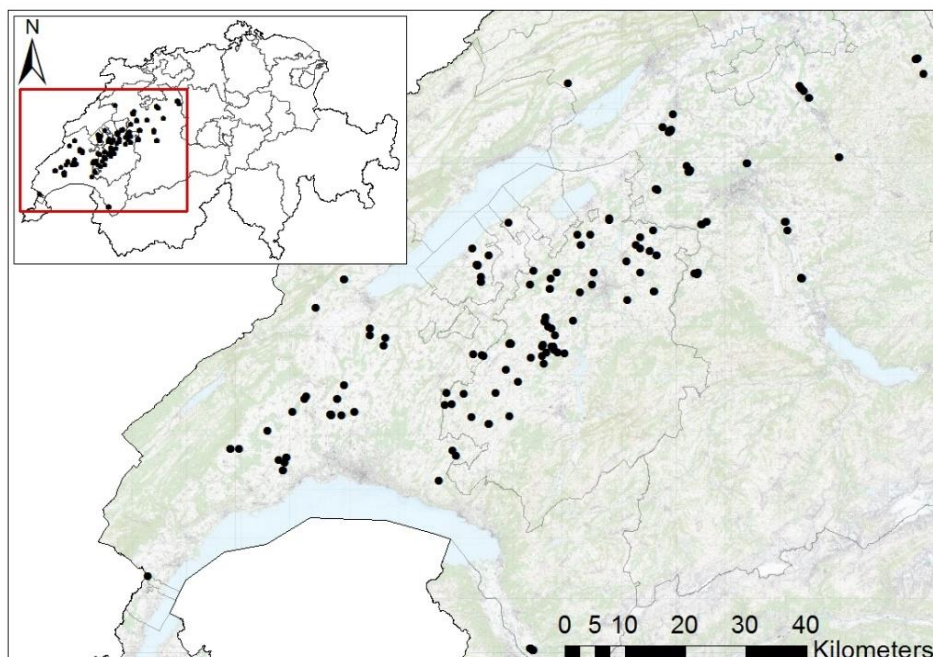


Abbildung 12. Probenahme STRUDEL in den Kantonen VD, FR und BE.

Die physikalische Bodenqualität wird seit Langem visuell bestimmt, namentlich durch die Beschreibung des Bodenprofils, das Krumenprofil (Gautronneau and Manichon, 1987) und die Spatenprobe. Diese Ansätze sind im Wesentlichen qualitativer Natur und beinhalten eine subjektive Komponente. Die VESS-Methode (Visual Evaluation of Soil Structure) erleichtert und objektiviert die Durchführung der Spatenprobe und liefert semiquantitative Ergebnisse (vgl. Askari et al., 2013; Ball et al., 2017, 2007; Guimarães et al., 2017; Mueller et al., 2013). Obwohl die Suche nach streng physikalischen Kriterien zur Bestimmung der Bodenstrukturqualität in einer grossen Zahl von Untersuchungen erörtert wurde, kam bis heute kein Konsens über die vorgeschlagenen Methoden zustande (vgl. Alaoui et al., 2011; Horn and Fleige, 2009). Mit dem Ziel, diese Einschränkung zu überwinden, wurden unlängst im Rahmen des Projekts STRUDEL (BAFU) einfache physikalische Grössen (Johannes, 2016) zur Klassierung der physikalischen Bodenqualität vorgeschlagen.

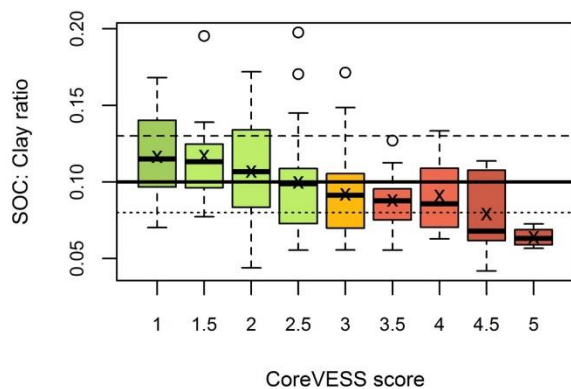


Abbildung 13. Beziehung zwischen VESS-Benotung und C_{org} -Ton-Verhältnis nach (Johannes et al., 2017a). Noten zwischen 1 und 3 stehen für eine gute, Noten zwischen 3 und 5 für eine schlechte Bodenstrukturqualität.

Bei der VESS-Methode wird die Bodenstrukturqualität mit einer Note zwischen 1 und 5 bewertet. Die Noten 1 bis 3 stehen für eine gute strukturelle Qualität, höhere Benotungen zwischen 3 und 5 hingegen weisen auf eine beeinträchtigte Bodenstruktur hin, die nach Verbesserungsmaßnahmen verlangt. Ein VESS-Test dauert nur etwa zehn Minuten. Eine Reihe von fünf Tests reicht

aus, um eine qualitative Veränderung der Bodenstruktur um 0.5 Punkte nachzuweisen und eine Parzelle mit einer relativen Präzision von 10 % zu bewerten (Leopizzi et al., 2018). Die Korrelationen zwischen VESS-Benotungen und physikalischen Messungen sind nachweislich hoch (Guimarães et al., 2013; Johannes et al., 2017b).

Im Rahmen des Projekts STRUDEL wurden rund 200 Böden vom Typ Braunerde bzw. Cambi-Luvisol (Food and Agriculture Organization, 2014) auf einem Gemisch aus Molasse oder Moräne in den Kantonen Bern, Freiburg und Waadt beprobt (Abbildung 12). Je ein Drittel dieser Böden wird als Dauerwiese (DW), in konventioneller Fruchtfolge mit Pflug (conventional tillage, CT) beziehungsweise seit mehr als 10 Jahren in konventioneller Fruchtfolge mit Direktsaat (no tillage, NT) bewirtschaftet. Bei der Auswahl wurde darauf geachtet, dass ein breites Spektrum an strukturellen Zuständen vertreten ist. Um die Beziehung zwischen OS-Gehalt und struktureller Qualität des A-Horizonts besser beschreiben zu können, wurden im Rahmen dieser Studie die Ergebnisse von Dexter et al. (2008) erneut erörtert und gleichzeitig neue Techniken zur Bestimmung der Struktur eingesetzt (Schrumpungsanalyse, VESS an Spatenprobe und VESS an ungestörten Ringproben (Johannes et al., 2017b)). Die Studie erlaubt es, Referenzwerte für den C_{org} -Gehalt vorzuschlagen, was zur Erhaltung der physikalischen Bodenqualität beitragen kann (Johannes et al., 2017a). Im Folgenden werden die Ergebnisse im Hinblick auf die daraus abgeleiteten Folgerungen diskutiert.

Bedeutung des C_{org} -Ton-Verhältnisses

Abb. 13 ist Johannes et al. (2017a) entnommen und setzt die festgestellten Bodenstrukturqualitäten in Bezug zum C_{org} -Ton-Verhältnis. Es zeigt sich, dass der Wert 3 (Grenze zwischen qualitativ guter und sanierungsbedürftiger Bodenstruktur) statistisch überschritten wird, wenn das C_{org} -Ton-Verhältnis unter 0.10 sinkt (0.17 für OS/Ton). Dies entspricht dem von Dexter et

al. (2008) festgestellten Verhältnis. Dieses Verhältnis ist nicht als Optimum in Bezug auf die Bestimmung der physikalischen Eigenschaften zu verstehen. In den entnommenen Proben steigen die Werte für die

physikalischen Eigenschaften mit zunehmenden C_{org}-Gehalt linear an, und zwar unabhängig vom Verhältnis zu Ton, welches auf zahlreichen beprobten Parzellen über 0.14 liegt (Johannes et al., 2017a).

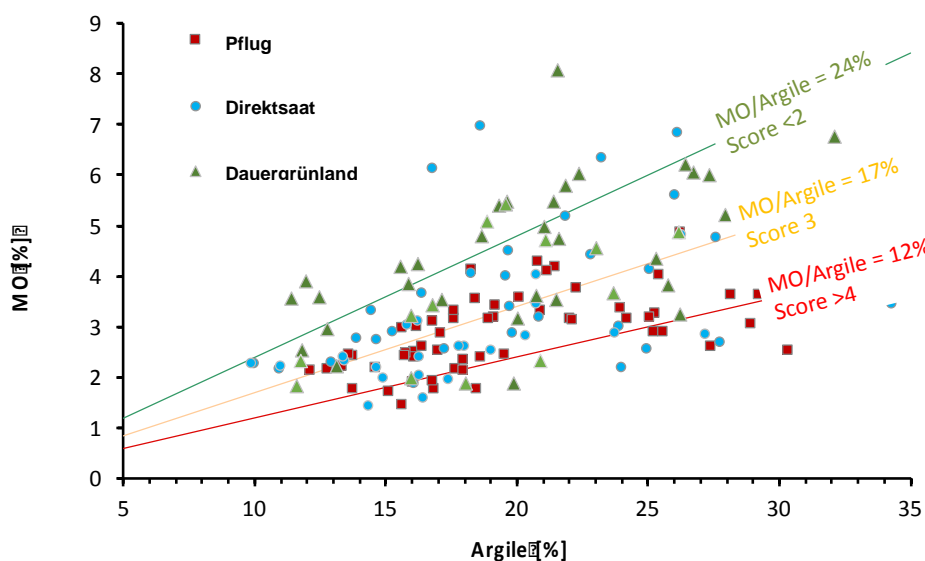


Abbildung 14. Proben aus dem Projekt STRUDEL, A-Horizont, 5–10 cm: Ton- und OS-Gehalte in % (gravimetrisch) und lineare Regression der VESS-Benotungen <2 (sehr gute Strukturqualität, grün); =3 (ausreichende Strukturqualität, orange) und >4 (beeinträchtigte Strukturqualität, rot). Direktsaatflächen wurden seit 10 Jahren nicht mehr gepflügt.

In Abb. 14 sind die festgestellten OS- und Tongehalte für die drei Bewirtschaftungsformen dargestellt. Für die VESS-Benotungen <2 (sehr gute Strukturqualität), 3 (ausreichende Strukturqualität) und >4 (beeinträchtigte Strukturqualität) wurde je eine Regressionsgerade eingezeichnet. Die Grafik macht deutlich, dass sich die Bodenstrukturqualität und das OS-Ton-Verhältnis proportional zueinander verhalten: Je tonhaltiger ein Boden ist, desto mehr organische Substanz ist nötig, damit eine bestimmte Strukturqualität erreicht wird. Die Landwirtinnen und Landwirte wissen dies, und auch in der Forschung wurde dieser Befund – wenn auch weniger detailliert – bereits hervorgehoben, etwa durch Feller and Baere (1997). Es wäre folglich falsch, einen festen Gehalt an organischer Substanz für den A-Horizont von Ackerböden zu empfehlen. Vielmehr ist ein Gehalt an organischer Substanz in Abhängigkeit vom Tongehalt zu empfehlen. Diese Tatsache ist seit Langem bekannt. So wird beispielsweise in den Düngungsempfehlungen der INRA seit Mitte des 20. Jahrhunderts das Verhältnis zwischen OS und Ton berücksichtigt (Julien, 2017, Abb. 15).

Auch in den «Grundlagen für die Düngung landwirtschaftlicher Kulturen in der Schweiz (GRUD 2017)» wurden ab 1994 Düngungsempfehlungen abhängig vom Tongehalt formuliert.

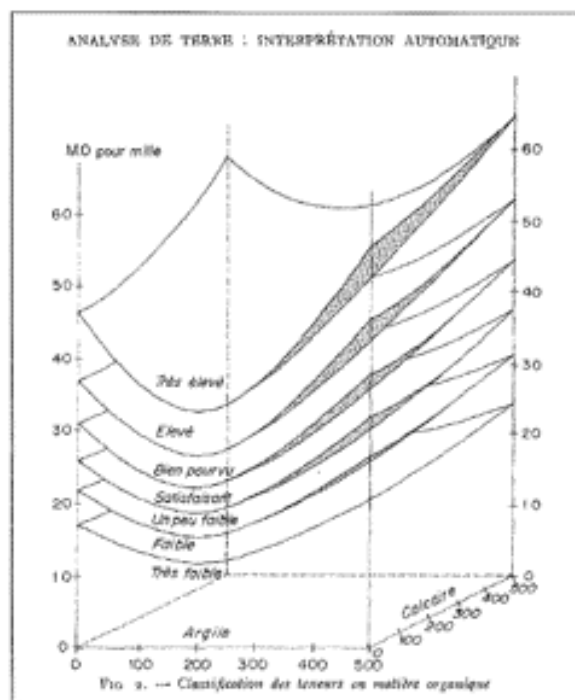


Abbildung 15. Diagramm zur Interpretation des Gehalts an organischer Substanz abhängig vom Ton- und Kalkanteil, aus Düngungsempfehlungen der INRA (Rémy, J-C, 1970 in Julien, J.-L., 2017).

OS-Gehalte in Schweizer Ackerböden

Abb. 16 zeigt die OS- und Tongehalte von Ackerböden im Kanton Genf, die vom bodenkundlichen Labor der hepia im Rahmen der ÖLN-Analysen ermittelt wurden (2015 Analysen). Die Empfehlungen gemäss GRUD 2009 sowie die kritischen Werte für das OS-Ton-Verhältnis nach Abb. 14 sind darin eingetragen. Die festgestellten Gehalte sind grösstenteils (in 75 % der Fälle) «befriedigend» im Sinne der GRUD. Nur wenige Parzellen finden sich in der Kategorie mit hohem OS-Gehalt, knapp 25 % sind der Kategorie mit ungenügendem Gehalt zugeordnet. Diese Feststellung ist auf den ersten Blick ermutigend. Allerdings liegt das durchschnittliche OS-Ton-Verhältnis mit 10 % (Corg/Ton 6 %) unter dem Grenzwert von 12 %, welcher dem Durchschnitt der VESS-Benotungen von >4 entspricht. Dieser Befund deckt sich mit dem im Feld beobachteten generell schlechten strukturellen

Zustand der Böden. Nach heutigem Wissensstand ist diese Feststellung durchaus repräsentativ für Ackerflächen in Europa (Dexter et al., 2008) und in anderen Kantonen. Die meisten Böden weisen ein OS-Ton-Verhältnis von rund 12 % auf und nur wenige erreichen den Wert von 17 % (nicht dargestellt), wobei die Bilanz in den Kantonen mit hohem Grasland- und Viehzuchtanteil wie Freiburg oder Jura etwas günstiger ausfällt. Diese Werte wurden im Zusammenhang mit dem strukturellen Zustand der Böden und auf der Grundlage von Beobachtungen im Feld definiert und besitzen Gültigkeit. Die GRUD dagegen beruhen nicht auf objektiven Bodeneigenschaften oder auf der Beobachtung von Kulturen, sondern mehrheitlich auf einem Ende des 20. Jahrhunderts erhobenen Zustand. Zu diesem Zeitpunkt war der Verlust an OS in den Böden jedoch bereits weit fortgeschritten (Lal, 2004).

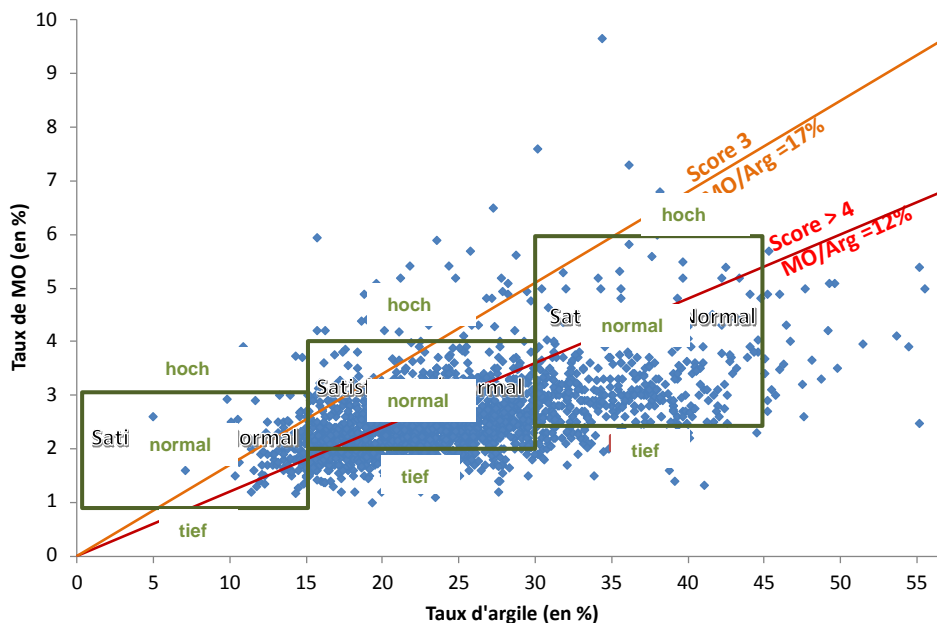


Abbildung 16. Ergebnisse der ÖLN-Analysen auf Parzellen im Kanton Genf mit Bewertung nach GRUD 2009 und nach den Schwellenwerten für das OS-Ton-Verhältnis (Auswirkung der OS auf die Bodenstrukturqualität).

Weitere Beobachtungen und Konsequenzen

Eine genaue Betrachtung der Abb. 13 liefert indes eine weitere eminent wichtige Erkenntnis für die Bewirtschaftung der Bodenqualität: Ziel der Beprobung war nicht ein

Vergleich unterschiedlicher Bewirtschaftungsmethoden (DW, CT und NT) und schon gar nicht der Bodenbearbeitung mit oder ohne Pflügen. Die Proben stammen aus einer Tiefe von 5 bis 10 cm, wo die OS-Gehalte von gepflügten und ungepflügten Böden nahe beieinanderliegen. Dass ein

Teil der ungepflügten Böden ein hohes OS-Ton-Verhältnis aufweist, spricht stark für diese Bewirtschaftungsmethode. Allerdings ist bei allen drei Bewirtschaftungsformen das Spektrum der beobachteten Werte extrem gross und die Spanne zwischen hoher und geringer Qualität praktisch identisch. Anders ausgedrückt: Manche gepflügten Ackerböden besitzen eine gute strukturelle Qualität und ein (sehr) gutes OS-Ton-Verhältnis, während zahlreiche Dauerwiesen und ungepflügte Ackerböden ein OS-Defizit und eine beeinträchtigte Struktur aufweisen. Zwar ist die Bodenstrukturqualität auf Dauerwiesen und Direktsaatflächen im Mittel leicht besser, aber das Verbesserungspotenzial ist innerhalb der einzelnen Bewirtschaftungsweisen deutlich grösser als im Vergleich der drei Methoden. Der Versuch, die Bodenqualität durch vorgeschriebene Massnahmen zu verbessern, ist daher zum Scheitern verurteilt. Dies zeigt auch das Agrarumweltmonitoring des BLW (Agrarbericht 2017). Die Forschung muss sich verstärkt mit den Gründen für diese Heterogenität befassen. Zu diesen Gründen zählen offenkundig auch Faktoren auf Parzellen- und Bewirtschaftungsebene sowie Faktoren, die mit der Produktions- und der Vermarktungskette im Zusammenhang stehen.

Aufgrund der jüngsten alarmierenden Erkenntnisse über die Beschleunigung der Klimaerwärmung und angesichts der Tatsache, dass die CO₂-Sequestrierung in bewirtschafteten Böden die einzige erfolgversprechende Negativemissionstechnologie (NET) darstellt (EASAC, 2018), wird der Druck auf die Landwirtschaft, C_{org} zu sequestrieren, massiv zunehmen. Die 4-per-1000-Initiative (<https://www.4p1000.org/>) schlägt vor, den C_{org}-Gehalt im Boden jährlich um den Faktor 1.004 zu erhöhen, was einer Steigerung um 13 Prozent innerhalb von 30 Jahren entspräche. Auf diese Weise soll der Temperaturanstieg in den kommenden Jahrzehnten auf weniger als +2 ° Celsius beschränkt werden können. Um eine minimale Bodenstrukturqualität zu erreichen, müsste das

OS-Ton-Verhältnis in Genfer Ackerböden von 10 auf mindestens 17 % ansteigen. Dies entspräche einer Erhöhung um 70 %. Diese Feststellung gilt für die meisten Ackerflächen in der Schweiz und in Europa. Betrachtet man das OS-Ton-Verhältnis, so müssen die Menge des zu sequestrierenden C_{org} und die zeitliche Dynamik des Anstiegs des OS-Gehalts neu berechnet werden. In der Tat scheint es so, dass mit entsprechenden Massnahmen der OS-Gehalt umso rascher ansteigt, je höher der Tongehalt und je grösser das OS-Defizit im Boden sind (Schimel et al., 1994). Im Gegensatz zu den meisten Rückschlüssen aus der Literatur haben zahlreiche Studien und Veröffentlichungen äusserst signifikante Anstiegsraten (Erhöhung des OS-Ton-Verhältnisses von 8–10 % auf 12–17 %) in Zeitspannen von fünf bis zehn Jahren dokumentiert. Die Verbesserung der Bodenstrukturqualität durch eine Steigerung des OS-Gehalts geht weit über klimabezogene Ambitionen hinaus. Dies stärkt die Glaubwürdigkeit der 4-per-1000-Initiative. Die kritischen Äusserungen und Vorbehalte (Baveye et al., 2018) zu dieser Frage sind damit zwar nicht entkräftet, aber der Landwirtschaft und der Bodenkunde wird auf diese Weise klar signalisiert, dass der Druck in naher Zukunft stark zunehmen wird. Ein Beispiel: Der Klimaplan des Kantons Genf (Teil 2, 20.12.2017) geht von einer Sequestrierung von 1,5 10³ t CO₂ in den Böden aus. Für die Erreichung eines OS-Ton-Verhältnisses von 17 % auf drei Vierteln aller Fruchtfootflächen und bis in eine Tiefe von 20 cm wären indessen annähernd 10⁶ t CO₂ erforderlich.

Bezogen auf die Bodenstrukturqualität bedeutet ein gutes OS-Ton-Verhältnis zwar eine hohe strukturelle Stabilität und Resilienz. Eine mechanische Verdichtung ist jedoch noch immer möglich. Deshalb muss nach jedem Bearbeitungsschritt eine Spatenprobe durchgeführt werden, um die Auswirkungen der Bearbeitung zu eruieren und gegebenenfalls Korrekturmassnahmen zu

ergreifen. In anderen Worten: Ein höherer OS-Gehalt schafft bessere Voraussetzungen für die Herausbildung und Stabilisierung der Bodenstruktur. Gleichzeitig müssen jedoch die Prozesse, welche die Bodenstruktur beeinträchtigen können, überwacht werden. Dies gilt insbesondere für die Gefahr einer mechanischen Verdichtung durch den Einsatz landwirtschaftlicher Maschinen.

Schlussfolgerungen

Das OS-Ton-Verhältnis ist ein Indikator für die potenzielle Bodenstrukturqualität. Ergänzend dazu braucht es jedoch kurzfristige Informationen, die mit Tests wie der Spatenprobe (Beurteilung der Folgen des Einsatzes von Maschinen) und der Terranimo-Methode (Vergleich von Bodendruck und Bodenfestigkeit) erhoben werden. Die Ausarbeitung einer Werteskala macht deutlich, dass dieses Verhältnis nicht weniger als 12 % betragen darf, 17 % erreichen sollte und in der Praxis bis zu 24 % betragen kann.

Gemessen an diesen Kriterien zeigt sich, dass die Böden in der Schweiz ein erhebliches OS-Defizit aufweisen und dass im Interesse der Bodenstrukturqualität eine Erhöhung des OS-Gehalts um mindestens 70 % wünschenswert wäre. Ein solcher Anstieg liegt deutlich über dem 4-per-1000-Ziel, scheint jedoch angesichts der Feststellungen aus der landwirtschaftlichen Praxis realistisch. Ohnehin wird der Druck auf die Nutzerinnen und Nutzer der Böden stark zunehmen, entsprechende Massnahmen durchzuführen.

Feldbeobachtungen machen ausserdem deutlich, dass die mittleren Unterschiede zwischen Methoden, die einen Anstieg des OS-Gehalts herbeiführen sollen (z. B. der Verzicht auf das Pflügen), und solchen mit negativen Auswirkungen (wie z. B. das Pflügen) im Vergleich zu den Unterschieden, die innerhalb der jeweiligen Kategorien beobachtet wurden, nicht sehr gross sind. Die Forschung muss sich vermehrt auf das Verständnis der Gründe für diesen Sachverhalt

konzentrieren. Und schliesslich plädiert dieser Beitrag nachdrücklich dafür, auf das Vorschreiben von Massnahmen zu verzichten, wie es derzeit der Fall ist, und stattdessen ergebnisorientierte Anreize zu setzen und den Landwirten die Wahl der Mittel freizustellen. Dieser Paradigmenwechsel ist für alle Entscheidungsbereiche zu empfehlen. Die Voraussetzungen dafür sind gegeben, denn die erforderlichen Indikatoren sind definiert und zugänglich.

Références

- Alaoui, A., Lipiec, J., Gerke, H.H., 2011. A review of the changes in the soil pore system due to soil deformation: A hydrodynamic perspective. *Soil Till Res*, 115–116, 1–15.
- Askari, M.S., Cui, J., Holden, N.M., 2013. The visual evaluation of soil structure under arable management. *Soil Till Res* 134, 1–10
- Ball, B.C., Batey, T., Munkholm, L.J., 2007. Field assessment of soil structural quality – a development of the Peerlkamp test. *Soil Use Manage* 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.
- Baveye, P.C., Berthelin, J., Tessier, D., Lemaire, G., 2018. The “4 per 1000” initiative: A credibility issue for the soil science community? *Geoderma* 309 118–123.
- Dexter, A.R., Richard, G., Arrouays, D., Czyz, E.A., Jolivert, C., Duval, O., 2008. Complexed organic matter controls soil physical properties. *Geoderma* 144, 620–627.
- EASAC, European Academies Science Advisory Council, 2018. Negative emission technologies: What role in meeting Paris Agreement targets? EASAC policy report 34
- Feller, C., Beare, M.H., 1997. Physical control of soil organic matter dynamics in the tropics. *Geoderma* 79, 69–116.
- Food and Agriculture Organization, 2014. World reference base for soil resources 2014 international soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. FAO, Rome.
- Gautronneau, Y., Manichon, H., 1987. Guide méthodique du profil cultural, CEREF-ISARA/GEARA-INAPG. ed.
- Guimarães, R.M.L., Ball, B.C., Tormena, C.A., Giarola, N.F.B., da Silva, Á.P., 2013. Relating visual evaluation of soil structure to other physical properties in soils of contrasting texture and management. *Soil Till Res* 127, 92–99.

- Guimarães, R.M.L., Lamandé, M., Munkholm, L.J., Ball, B.C., Keller, T., 2017. Opportunities and future directions for visual soil evaluation methods in soil structure research. *Soil Till Res* 173, 104–113.
- Horn, R., Fleige, H., 2009. Risk assessment of subsoil compaction for arable soils in Northwest Germany at farm scale. *Soil Till Res*, 102, 201–208.
- Johannes, A., 2016. Structural degradation of agricultural soils: assessment and setting threshold values for regulation (PhD thesis). ETHZ, Zurich.
- Johannes, A., Matter, A., Schulin, R., Weiskopf, P., Baveye, P.C., Boivin, P., 2017a. Optimal organic carbon values for soil structure quality of arable soils. Does clay content matter? *Geoderma* 302 14–21.
- Johannes, A., Weiskopf, P., Schulin, R., Boivin, P., 2017b. To what extent do physical measurements match with visual evaluation of soil structure? *Soil Till Res* 173, 24–32.
- Julien, J.-L., 2017. *Entre agronomie et agriculture: La Station agronomique de l'Aisne 120 ans de recherche-développement*. Editions L'Harmattan.
- Kay, B.D., 1998. Soil structure and organic carbon: a review. In: R. Lal, et al. (Ed.), *Soil Processes and the Carbon Cycle*, *Advances in Soil Science*. Boca Raton, Fla. CRC Press, pp. 169–197.
- Lal, R., 2004. Soil Carbon Sequestration Impacts on Global Climate Change and Food Security. *Science* 304, 1623–1627.
- Leopizzi, S., Gondret, K., Boivin, P., 2018. Spatial variability and sampling requirements of the visual evaluation of soil structure in cropped fields. *Geoderma* 314, 58–62.
- Mueller, L., Shepherd, G., Schindler, U., Ball, B.C., Munkholm, L.J., Hennings, V., Smolentseva, E., Rukhovic, O., Lukin, S., Hu, C., 2013. Evaluation of soil structure in the framework of an overall soil quality rating. *Soil Till Res* 127, 74–84.
- Rapport agricole 2017 - Indicateurs agro-environnementaux (IAE) URL <https://www.agrarbericht.ch/fr/environnement/monitoring-agro-environnemental/indicateurs-agro-environnementaux-iae> (accessed 3.28.18).
- Richner, W., Sinaj, S., 2017. Grundlagen für die Düngung landwirtschaftlicher Kulturen in der Schweiz (GRUD 2017). *Agrarforschung Spezialpublikation*, 276 S.
- Schimel, D.S., Braswell, B.H., Holland, E.A., McKeown, R., Ojima, D.S., Painter, T.H., Parton, W.J., Townsend, A.R., 1994. Climatic, edaphic, and biotic controls over storage and turnover of carbon in soils. *Global Biogeochem Cycles* 8, 279–293.

3.2 Erkenntnisse aus fünf Jahren bodenbiologischem Monitoring der Nationalen Bodenbeobachtung und weitere Schritte für die Zukunft

Anna-Sofia Hug, Franco Widmer, Florian Gschwend und Andreas Gubler

Agroscope, Forschungsgruppe Bodenfruchtbarkeit und Bodenschutz
Departement Agrarökologie und Umwelt
Reckenholzstrasse 191
CH-8046 Zürich

Die hier folgenden Ausführungen entstammen mehrheitlich dem kürzlich erschienenen Bericht «NABObio - Bodenbiologie in der Nationalen Bodenbeobachtung». Ergebnisse 2012-2016, Handlungsempfehlungen und Indikatoren (Hug et al., 2018). Alle Details zur bodenbiologischen Dauerbeobachtung innerhalb der NABO können diesem Bericht entnommen werden (auch unter www.nabo.ch als pdf zum download).

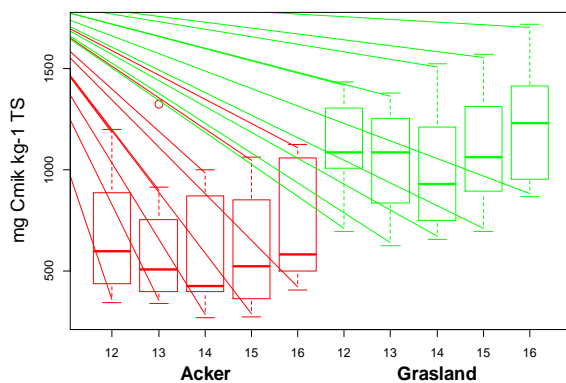


Abbildung 17. Mikrobielle Biomasse (SIR) der Nutzungsklassen Acker (rot) und Grasland (grün) über die Jahre 2012 - 2016; n=100 (20 Standorte à 5 Jahresmittelwerte). Boxplot mit Medianen.

NABObio

Seit 2012 erfasst die NABO im Rahmen des bodenbiologischen Monitorings NABObio an 30 NABO-Standorten jährlich Informationen über die Menge, Aktivität und Qualität des Bodenmikrobioms. Zur umfassenden Interpretation der mikrobiologischen Messungen werden sowohl chemische und physikalische Begleitparameter, als auch Informationen über die Witterung und die Bewirtschaftung erfasst.

Wie erwartet zeigen die Ergebnisse der ersten fünf Jahre nutzungsbedingte Unter-

schiede. Ackerstandorte weisen dabei tiefere Gehalte an mikrobieller Biomasse, Basalatmung und DNS-Menge auf als Grasland- und Waldstandorte (Abb. 16 bis 19). Die Werte für die mikrobielle Biomasse und Basalatmung zeigen über die fünf Jahre eine gute Wiederholbarkeit. Auch die Struktur der mikrobiellen Gemeinschaften (Beta diversität) blieb während der letzten fünf Jahre stabil. Damit konnten für alle NABObio-Standorte standorttypische Werte für die Biomasse, Basalatmung und mikrobiellen Gemeinschaften definiert werden.

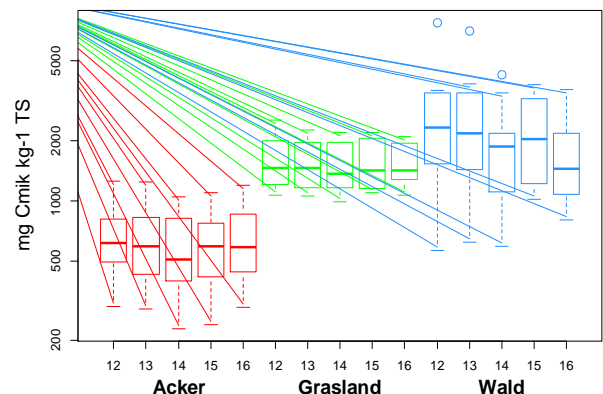


Abbildung 18. Mikrobielle Biomasse (FE-C) der Nutzungsklassen Acker (rot), Grasland (grün) und Wald (blau) über die Jahre 2012 - 2016; n=150, (30 Standorte à 5 Jahresmittelwerte). Boxplot mit Medianen; y-Achse log-transformiert.

Es hat sich gezeigt, dass signifikante Veränderungen von bodenbiologischen Messwerten erst innerhalb einer mehrjährigen Zeitreihe und nur zusammen mit Zusatzinformationen über den Standort interpretiert werden können. Die relativ hohen Korrelationskoeffizienten ($r=0.82-0.91$) zwischen den Summenparametern der mikrobiologischen (FE_C, SIR) und molekularbiologischen Bio-

masse (DNS-Menge) weisen auf redundante Informationen über die Menge der Bodenmikroorganismen hin (Abb. 20). In Zukunft wird in NABObio die Biomasse nur noch mit FE_C bestimmt.

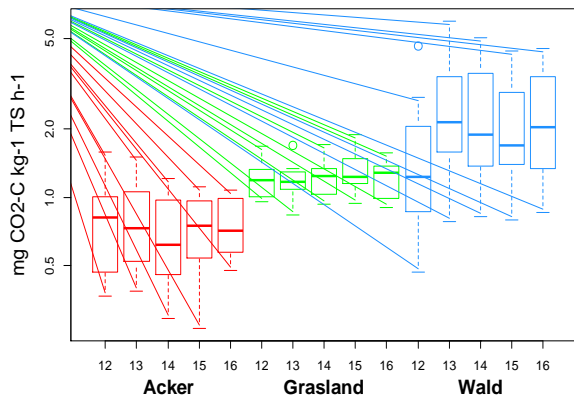


Abbildung 19. Basalatmung der Nutzungsklassen Acker (rot), Grasland (grün) und Wald (blau) über die Jahre 2012 - 2016; n=150, (30 Standorte à 5 Jahresmittelwerte). Boxplot mit Medianen; y-Achse log-transformiert.

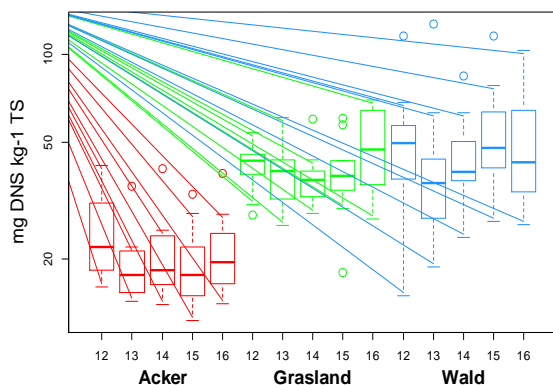


Abbildung 20. DNS-Mengen der Nutzungsklassen Acker, Grasland und Wald über die Jahre 2012 - 2016; n=150, (30 Standorte à 5 Jahresmittelwerte). Boxplot mit Medianen; y-Achse log-transformiert.

Die Diversitätsuntersuchungen der DNS-Extrakte haben gezeigt, dass sich die Bestimmung des mikrobiellen Artenreichtums (Alphadiversität) nur beschränkt für die Dauerbeobachtung eignet, da dieser wenig mit anderen Umweltfaktoren korreliert und nicht nutzungstypisch ist. An unterschiedlichen Standorten und Nutzungsklassen werden teils sehr ähnliche OTU Reichtumswerte ge-

funden (Abb. 21). OTUs sind die Grundeinheiten des Metabarcodings und können analog zu Arten analysiert werden. So wird der Begriff OTU Reichtum anstelle des Artenreichtums verwendet (siehe Kasten). Dies im Gegensatz zur Zusammensetzung der mikrobiellen Gemeinschaften, den sogenannten Gemeinschaftsstrukturen. Durch die mehrjährige Erhebung konnte gezeigt werden, dass jeder der 30 NABObio-Standorte eine ihm eigene mikrobielle Gemeinschaftsstruktur aufweist. Zudem weisen auch die Landnutzungstypen (Acker, Grasland und Wald) verschiedenartige mikrobielle Gemeinschaften auf (Abb. 22).

Wie funktioniert das Metabarcoding?

Da verschiedene Arten unterschiedliche DNS Sequenzen besitzen, können Organismen durch das Sequenzieren von bestimmten DNS Abschnitten, sogenannten DNS Barcodes, identifiziert werden. Eine Weiterentwicklung des DNS Barcodings ist das Metabarcoding, bei dem anstelle einzelner Organismen ganze biologische Gemeinschaften beschrieben werden (Taberlet et al. 2012). Dabei wird die gesamte DNS einer Umweltprobe extrahiert und alle darin enthaltenen DNS Barcodes sequenziert. Somit können alle Organismen einer biologischen Gemeinschaft identifiziert und ihre relative Häufigkeit bestimmt werden (Hartmann et al. 2015). Da insbesondere bei Mikroorganismen die meisten Arten weiterhin unbeschrieben sind (Hawksworth und Lücking, 2017), werden die Sequenzen nach ihrer Ähnlichkeit gruppiert. Die Gruppen sehr ähnlicher Sequenzen, üblicherweise Sequenzen mit mindestens 97% Übereinstimmung, werden als **OTUs** (operational taxonomic units) bezeichnet.

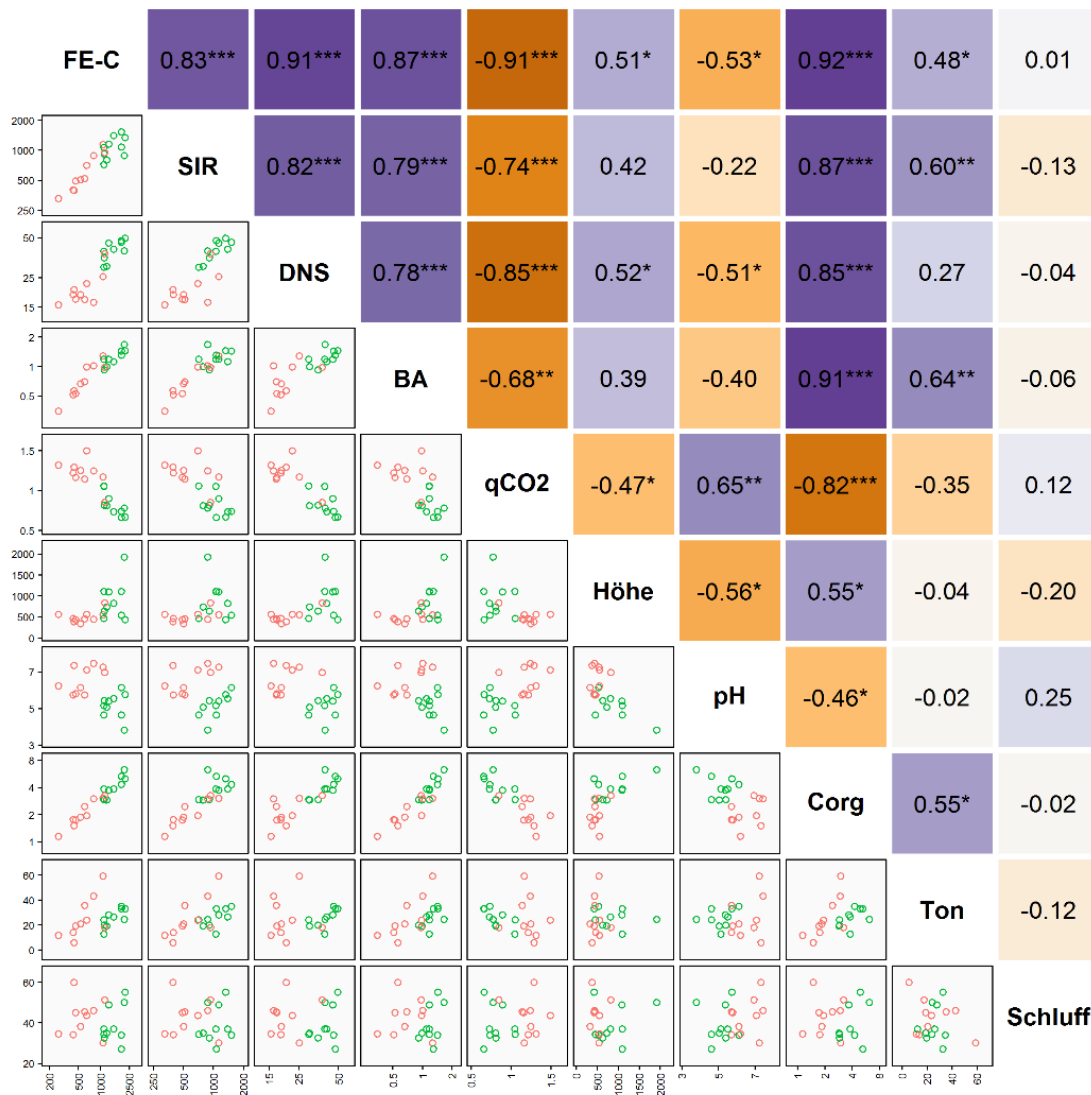


Abbildung 21. Streudiagramme und Korrelationen (nach Spearman; * $p < 0.05$; ** $p < 0.01$; * $p < 0.001$) zwischen den NABObio-Standorten für mikrobiologische Parameter, Boden- und Standorteigenschaften. Farbe der Quadrate: violett = positive Korrelationen, orange = negative Korrelationen, grau = keine bzw. sehr geringe Korrelationen. Je intensiver der Farbton, desto höher ist der Korrelationsfaktor r . Pro Messgröße ist jeweils der Mittelwert 2012-2016 pro Standort dargestellt. Die Farben der Kreise zeigen die Landnutzung: rot: Acker; grün: Grasland.**

Ändern sich in Zukunft die mikrobiellen Gemeinschaften an einem Standort, können mit Hilfe der Zusatzinformationen mögliche Ursachen festgestellt und Veränderung qualitativ beurteilt werden. Die konservierten

DNS-Extrakte ermöglichen zudem neue Fragestellungen, wie z. B. Einflüsse von Pflanzenschutzmitteln, Antibiotika oder des Klimawandels mit spezifischen Analysen zu bearbeiten.

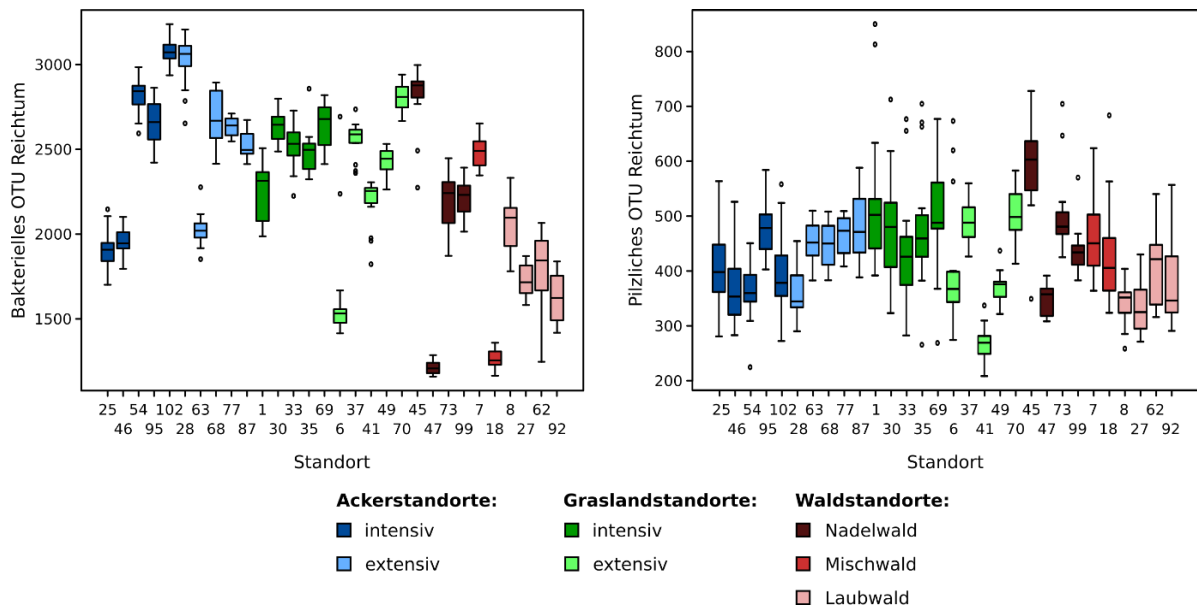


Abbildung 22. OTU Reichtum der Bakterien (links) und Pilze (rechts) der NABObio-Standorte.

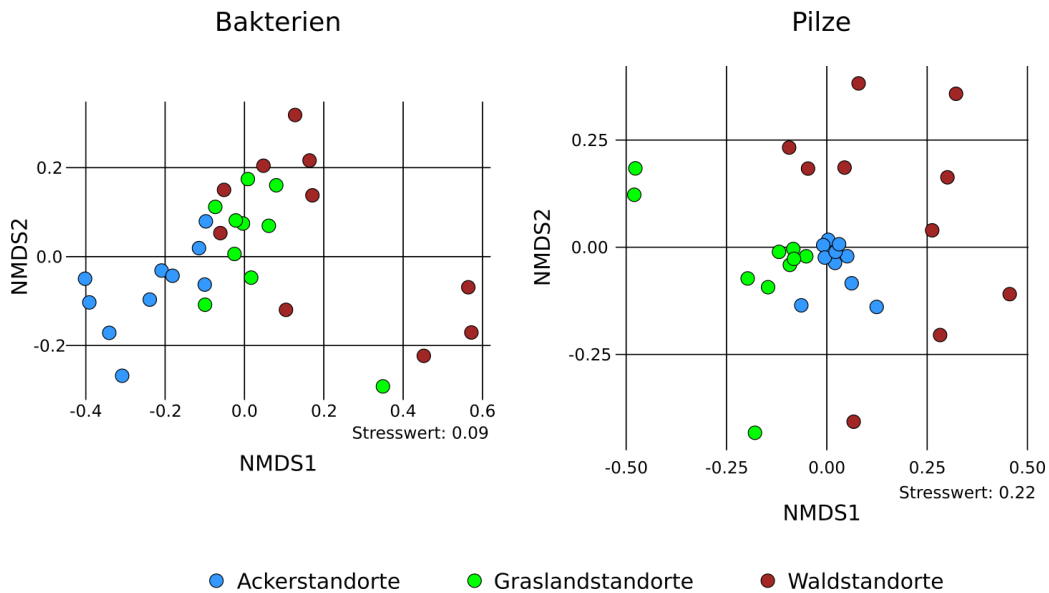


Abbildung 23. Ordinationen der Vergleiche von bakteriellen (links) und pilzlichen (rechts) Gemeinschaftsstrukturen. Jeder Punkt stellt eine ‚mittlere‘ Gemeinschaftsstruktur eines NABObio-Standorts dar, die Farbe gibt den jeweiligen Nutzungstyp an. Je näher sich zwei Punkte sind, desto ähnlicher sind die Gemeinschaftsstrukturen der Standorte.

NABObio in der Zukunft

Das bodenbiologische Monitoring im Rahmen von NABObio wird ab 2017 mit jährlichen Erhebungen an 9 Acker- und 10 Graslandstandorten fortgesetzt. Die mikrobielle Biomasse wird seit 2017 nur noch mit der Methode der Chloroform-Fumigation-Extraktion bestimmt. Die Methode ist international weit verbreitet und robuster als die SIR-Methode. Zusätzlich lässt sich damit der mikro-

bielle Stickstoff bestimmen. Im Rahmen einer Stuserhebung werden seit 2018 bis 2022 für das gesamte Messnetz der NABO die mikrobielle Biomasse, die Basalatmung, die DNS-Menge und die mikrobiellen Gemeinschaftsstrukturen bestimmt. Damit kann die NABO ab 2023 Auskunft über die Aktivität, Menge und Zusammensetzung des Mikrobioms aller 111 Standorte geben. Darüber hinaus werden die DNS-Extrakte konserviert und stehen damit auch noch für spätere Fragestellungen zur Verfügung.

Basierend auf den Ergebnissen von 2012 – 2016 wurden Handlungsempfehlungen formuliert, die für die Betreiber von bodenbiologischen Dauerbeobachtungsprogrammen als Entscheidungsgrundlage dienen können:

- Jährlich drei Mischproben aus einer genügend grossen Fläche. Insbesondere bei heterogenen Standorten sollte die beprobte Fläche rund 100 m² aufweisen.
- Beprobung zu stets derselben Jahreszeit als Voraussetzung für die Vergleichbarkeit der Resultate zwischen den Jahren.
- Als Messgrössen werden ein Aktivitätsparameter (Basalatmung), ein Summenparameter (Biomasse) und ein Diversitätsparameter empfohlen.
- Archivierung der DNS-Extrakte, diese können für spätere Fragestellungen erneut analysiert werden.
- Verwenden von standardisierten Methoden, die während der gesamten Laufzeit des Monitorings nicht mehr geändert werden sollten. SOPs werden dringend empfohlen.
- Schweizweit einheitliche Methoden zur Erhöhung der Vergleichbarkeit und der nationalen Abdeckung.
- Zusätzliche Standortinformationen sind zwingend notwendig: physikalische und chemische Bodenparameter, Witterungs- und Bewirtschaftungsdaten sollten, wenn immer möglich, bekannt sein.
- Zur Prüfung der Stabilität des Messsystems über die Jahre sind regelmässige Analysen einer Referenzprobe durchzuführen.
- Die statistische Auswertung der Daten bereits bei der Konzeption des Monitoring-Programms mit einem Experten planen. U.a. ist dabei zu beachten, dass bei Monitoringdaten die wiederholten Messungen pro Standort keine unabhängigen Beobachtungen darstellen.

Erarbeiten von Indikatoren

Zustand und Entwicklung der Böden können mit Hilfe von Indikatoren einfacher vermittelt werden. Diese können von physikalischen, chemischen und biologischen Messgrössen abgeleitet und durch Verknüpfung verschiedener Analysedaten zu einem Gesamtbild zusammengefasst werden. Indikatoren sollen den Zustand einer wichtigen Eigenschaft bzw. einer Leistung des Bodens wiedergeben und verständliche, aber dennoch aussagekräftige Kenngrössen darstellen. Damit sollen sie auch für politische Entscheidungsträger und die Öffentlichkeit fassbar gemacht werden. Idealerweise besteht ein Indikator nicht aus reinen Messgrössen. Aussagekräftiger ist es, wenn die Messwerte anhand von Referenzwerten qualitativ beurteilt werden können.

Ein Beispiel dafür ist die grafische Darstellung der beurteilten mikrobiellen Messwerte von NABObio (Abb. 23). Die mikrobielle Biomasse umfasst jenen Anteil der organischen Bodensubstanz, der aus lebenden Mikroorganismen besteht. Diese sind für viele Bodenfunktionen zentral. Eine grosse Menge an Mikroorganismen ist deshalb ein Indikator für eine gute Bodenqualität (Ottow, 2011). Zudem korreliert die mikrobielle Biomasse stark mit dem organischen Kohlenstoffgehalt und reagiert empfindlich auf Störungen. Die Beurteilung der gemessenen Werte basiert auf berechneten standorttypischen Werten und umfasst Klassen von sehr hoch bis tief (Abb. 24) (Oberholzer et al., 1999). Ein analoges Vorgehen zur Beurteilung von gemessenen Basalatmungswerten besteht ebenfalls.

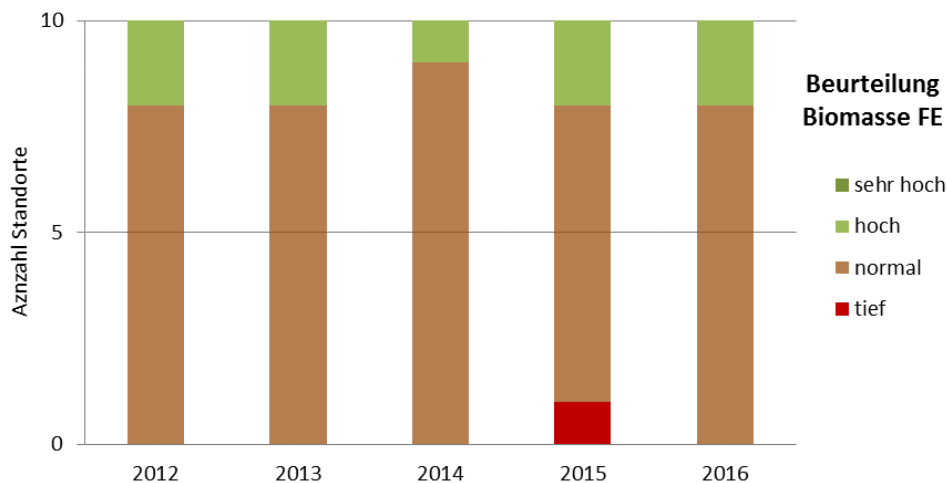


Abbildung 24. Beurteilung der Biomasse FE-C-Gehalte von 2012 – 2016 der NABObio-Ackerstandorte basierend auf berechneten standorttypischen Werten.

Mit der grafischen Darstellung der Anteile der einzelnen Klassen pro Messjahr wird der Zustand und die Entwicklung der analysierten Böden in Bezug auf die Menge der vorhandenen mikrobiellen Biomasse leicht verständlich dargestellt. Dies ist für die Kommunikation an ein breites Publikum, wie es die Umweltberichterstattung anstrebt, Voraussetzung. Mit nur 10 Standorten ist die Aussagekraft jedoch beschränkt. In Zusammenarbeit mit kantonalen bodenbiologischen Monitoringprogrammen soll die Datengrundlage ausgeweitet und die Aussagekraft der Indikatoren erhöht werden.

Molekularbiologie

Die rasche Entwicklung der molekularbiologischen Analysemethoden eröffnen der Bodenbeobachtung ganz neue Möglichkeiten, um Zustand und Entwicklung des Bodens noch umfangreicher beschreiben zu können – über die Summenparameter hinaus kann nun immer detaillierter auch die Zusammensetzung des Mikrobioms erfasst werden. Da die Bodenorganismen für die meisten Bodenfunktionen eine zentrale Rolle spielen, sind Informationen über das Mikrobiom für die Beurteilung der Bodenqualität unabdingbar. In NABObio konnten wir in einem ersten Schritt die Standort-Typizität der mikrobiellen Gemeinschaften erfassen. In einem nächsten Schritt soll nun nach Organismengruppen gesucht werden, die sensibel auf definierte (negative oder

positive) Umwelteinflüsse reagieren und so als Indikatoren fungieren können. Dies bedingt einerseits die Untersuchung der Auswirkungen von definierten Stressfaktoren auf das Bodenmikrobiom von NABO-Standorten sowie eine vertiefte Analyse der bereits vorhandenen Daten. Andererseits aber auch die Ausweitung des Messnetzes. Indem beispielsweise das ganze NABO-Messnetz beprobt wird oder auch KABO-Standorte miteinbezogen werden. Damit kann das Spektrum von standorttypischen Organismengemeinschaften betreffend Bodeneigenschaften oder Nutzung und damit die statistischen Auswertungsmöglichkeiten erweitert werden. Hierzu ist es unbedingt notwendig, dass, wenn immer möglich, schweizweit standardisierte Untersuchungsmethoden angewendet werden.

Literatur:

- Hartmann, M., Frey, B., Mayer, J., Mäder, P., Widmer, F., 2015. Distinct soil microbial diversity under long-term organic and conventional farming. *The ISME Journal* (2015) 9, 1177–1194.
- Hawksworth, D., Lücking, R., 2017. Fungal Diversity Revisited: 2.2 to 3.8 Million Species, p 79-95. In Heitman, J., Howlett, B., Crous, P., Stukenbrock, E., James, T, Gow N (ed), *The Fungal Kingdom*. ASM Press, Washington, DC.
- Hug A.-S., Gubler A., Gschwend F., Widmer F., Oberholzer, H.R., Frey, B., Meuli R. G., 2018: NABObio - Bodenbiologie in der Nationalen Bodenbeobachtung. Ergebnisse 2012-2016, Handlungsempfehlungen und Indikatoren. *Agroscope Science*, 63, 2018, 1-55.

- Oberholzer, H.-R., Rek, J., Weisskopf, P., Walther, U., 1999. Evaluation of soil quality by means of microbiological parameters related to the characteristics of individual arable sites. *Agribiological Research* 52 (2), 113–125.
- Ottow, J.C.G., 2011. *Mikrobiologie von Böden. Biodiversität, Ökophysiologie und Metagenomik*. Springer Verlag Berlin Heidelberg. 485 S.
- Taberlet, P., Coissac, E., Pompanon, F., Brochmann, C., Willerslev, E., 2012. Towards next-generation biodiversity assessment using DNA metabarcoding. *Molecular Ecology* 21, 2045–2050.

Impressum VBBio-Bulletin Nr. 18/2018

Herausgeberin: VBBio

(Arbeitsgruppe «Vollzug BodenBiologie»)

Die kantonalen Bodenschutzfachstellen und das Bundesamt für Umwelt (BAFU) haben die Arbeitsgruppe unter dem Namen VBB 1995 gegründet. Diese widmet sich Fragen zur Bodenbiologie im Hinblick auf den Vollzug des Bodenschutzes und die Erhaltung der Bodenfruchtbarkeit nach der Verordnung über die Belastung des Bodens (VBBo).

Vorsitzender seit 2018

Dominik A. Müller
Kanton Aargau
Departement Bau, Verkehr und Umwelt
Abteilung für Umwelt,
Grundwasser, Boden und Geologie
Entfelderstrasse 22
5001 Aarau
Tel. 062 835 34 08
E-Mail: dominik.mueller@ag.ch

Sekretariat und Bezug

Dr. Andreas Fliessbach
Forschungsinstitut für biologischen Landbau (FiBL)
Ackerstrasse
CH-5070 Frick
Tel. 062 865 72 25
Fax. 062 865 72 73
E-Mail: andreas.fliessbach@fibl.org

Das Bulletin ist auch im Internet verfügbar:
<http://www.bafu.admin.ch/bodenschutz/> >
Fachinformationen > Massnahmen für den Bodenschutz > Bodenbiologie