

G2: Bodenforschung an der landwirtschaftlichen Forschungsanstalt Agroscope

Volker Prasuhn, Peter Weisskopf; Thomas Bucheli, Thomas Keller, Ernst Spiess, Marcel van der Heijden, Simon Mangold, Jochen Mayer, Peter Schwab, Felix Wettstein, Franco Widmer, Raphael Wittwer

Agroscope Standort Reckenholz, Reckenholzstrasse 191, CH-8046 Zürich

Agroscope und landwirtschaftliche Forschung

Agroscope ist die landwirtschaftliche Forschungsanstalt der Bundesverwaltung und dem Bundesamt für Landwirtschaft angegliedert.

Gemäß Landwirtschaftsgesetz unterstützt die Bundesverwaltung die Landwirtschaft in ihrem Bestreben, rationell und nachhaltig zu produzieren, indem sie Wissen erarbeitet und weitergibt. Zu diesem Zweck forscht Agroscope entlang der gesamten Wertschöpfungskette der Land- und Ernährungs-wirtschaft. Ziele sind eine wettbewerbsfähige und multifunktionale Landwirtschaft, hochwertige Lebensmittel für eine gesunde Ernährung sowie eine intakte Umwelt. Vier Aufgaben stehen im Vordergrund:

- Forschung und Entwicklung im Agrar-, Ernährungs- und Umweltbereich.
- Bereitstellen von Entscheidungsgrundlagen für die Behörden.
- Vollzugsaufgaben im Rahmen der gesetzlichen Vorgaben im Dienste der Landwirtschaft und der Allgemeinheit.
- Wissensaustausch und Technologietransfer mit der Praxis, der Beratung, der Wirtschaft, der Wissenschaft, der Lehre und der Öffentlichkeit.

Agroscope arbeitet an mehreren Standorten und hat 10 Forschungsbereiche, die jeweils mehrere Forschungsgruppen umfassen.

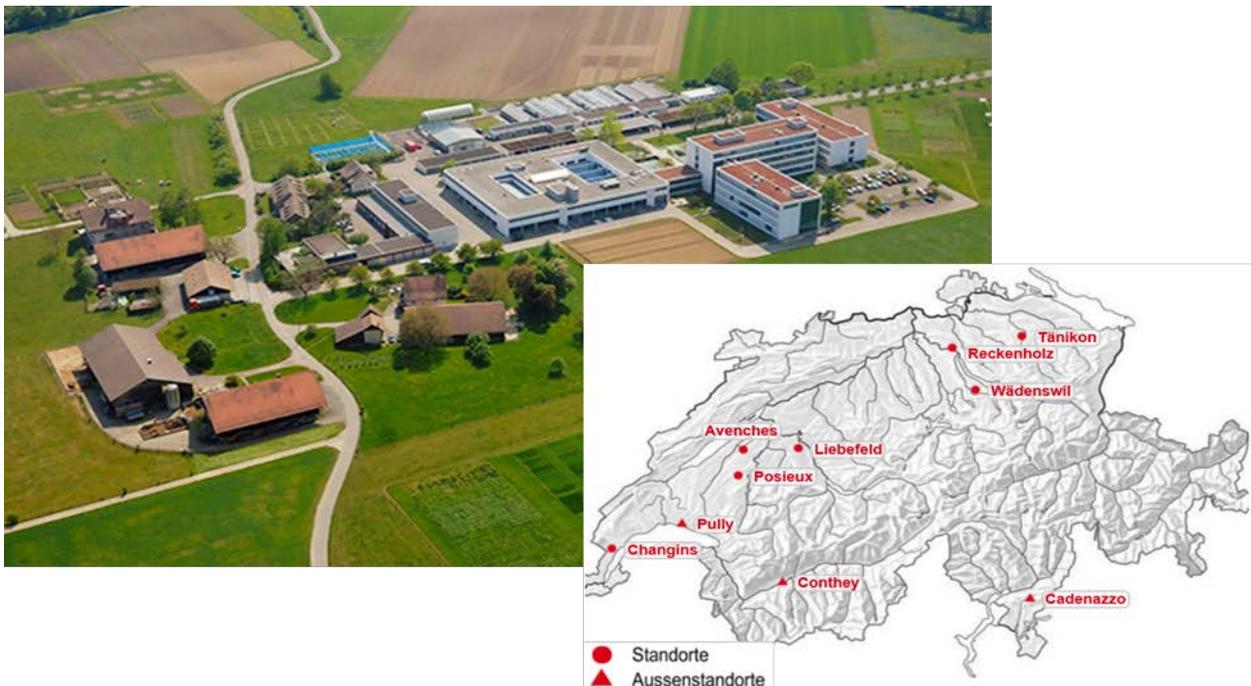


Abb. 1: Berner Agroscope Standort Reckenholz im Norden von Zürich

Bodenkundliche Forschung an der Agroscope

Eine zentrale Bedeutung kommt dem besseren Verständnis der Bodenprozesse sowie den Möglichkeiten, sie zu beeinflussen, zu. Dabei geht es um die Erfassung der aktuellen Belastungssituation der Schweizer Böden, das Wissen um deren Auswirkungen sowie um die Erarbeitung von Empfehlungen für eine nachhaltige, standortgerechte Bodenbewirtschaftung und den Schutz der Bodenfunktionen.

Die wichtigsten Ziele der bodenkundlichen Forschung an Agroscope sind:

1. Wissen zu grundlegenden physikalischen, chemischen und biologischen Bodenprozessen, zu deren Interaktionen, sowie zu Bodenfunktionen und Ökosystemleistungen generieren. Dabei werden Wechselwirkungen und Abhängigkeiten mit Standorteigenschaften, Klima und landwirtschaftlicher Bewirtschaftung berücksichtigt.
2. Böden in Bezug auf ihre Qualität bewerten und Belastungsgrenzen im Zusammenhang mit externen Einflüssen aufzeigen.
3. Grundlagen für eine verbesserte Bodennutzung und -bewirtschaftung erarbeiten, und dabei landwirtschaftliche Produktion, Ressourceneffizienz und ökologische Dienstleistungen gegeneinander abwägen.
4. Informationen für die Beurteilung der langfristigen Entwicklung von Produktions- und Ökosystemfunktionen bereitstellen.
5. Bodeninformationen nutzbar machen.

Die bodenkundliche Forschung von Agroscope

1. versucht, die vorhandenen Kompetenzen interdisziplinär zu koordinie-

ren und für die Bearbeitung von übergreifenden Fragen im landwirtschaftlichen Kontext zu bündeln, um Grundlagen für sinnvolle Kundenentscheidungen auszuarbeiten; Kunden sind eidgenössische und kantonale Behörden, aber auch Landwirte, landwirtschaftliche Beratung, Verbände, Bodenschutzfachstellen und Marktakteure. Daneben gehören auch die nationale und internationale Forschungsgemeinschaft, Ausbildungsinstitutionen verschiedener Ebenen sowie die Öffentlichkeit zu Bezüglern von Forschungsergebnissen;

2. nutzt das in Agroscope vorhandene breite Wissen über agronomische Aspekte der Bodennutzung und -bewirtschaftung, um für die Kunden anwendbares wirkungsorientiertes Wissen zu generieren und allenfalls in Forschungspartnerschaften einzubringen.
3. kann dank der vorhandenen Infrastrukturen, Versuchsflächen und technischen Ausrüstungen, sowie dank der Organisations- und Finanzierungsmöglichkeiten experimentelle Arbeiten im Feld-, Gewächshaus- und Labormaßstab durchführen, auch in Form langfristiger Versuche und Beobachtungsreihen.

Die bodenkundliche Forschung von Agroscope liefert ihre Ergebnisse in Form von auf die Kundenwünsche bezogenen Konzepten und Entscheidungsgrundlagen sowie als konkrete Lösungsansätze für die nachhaltige Nutzung und den Schutz landwirtschaftlicher Böden. Die Informationen werden so zur Verfügung gestellt, dass sie auf der Ebene der Leistungsbezüger optimale Wirkung erzielen können.

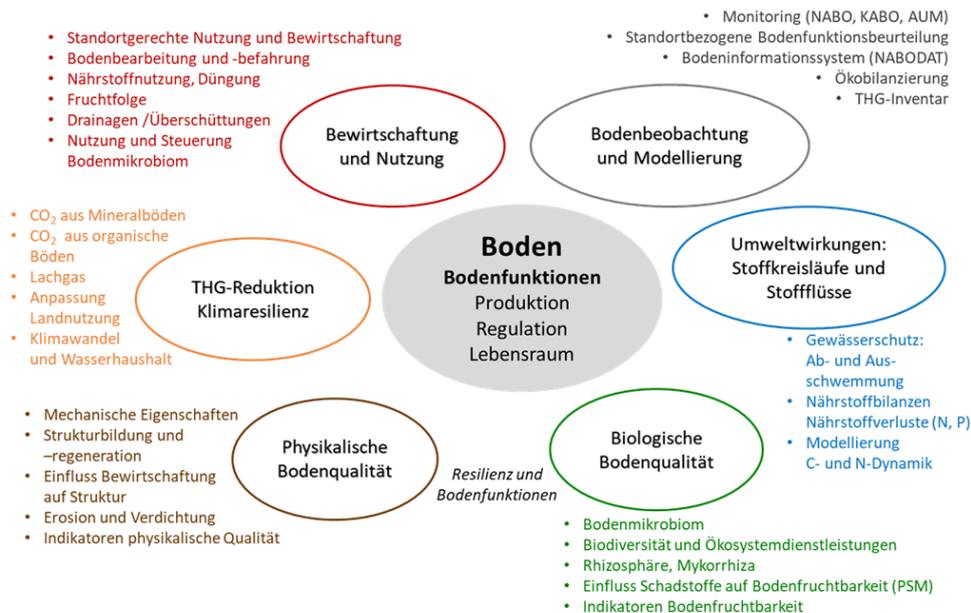


Abb. 2: Die bearbeiteten Themen lassen sich in sechs Themenfelder gruppieren. Verschiedene Aspekte (z.B. Ökobilanzierung, THG-Inventar, Lachgas-Emission) sind nicht bodenzentriert, berücksichtigen aber Bodenwissen.

BLW Thema "Boden": <https://www.blw.admin.ch/blw/de/home/nachhaltige-produktion/umwelt/boden.html>

Bodenforschung Agroscope: <https://www.agroscope.admin.ch/agroscope/de/home/themen/umwelt-ressourcen/boden-gewaesser-naehrstoffe.html>

Exkursionspunkt 1: Lysimeteranlage mit 72 natürlich strukturierten Böden

Volker Prasuhn, Ernst Spiess

Am Standort Zürich-Reckenholz wurde 2008 eine neue Groß-Lysimeteranlage gebaut. Sie umfasst 72 Lysimetergefäße mit jeweils 1 m² Oberfläche und 150 cm Tiefe. Die Anlage ist unterkellert (Abb. 3). Die Böden wurden alle monolithisch entnommen. Zur Gewinnung exakter Bodenmonolithe wurden das speziell entwickelte und international bewährte Verfahren der Umwelt-Geräte-Technik GmbH (UGT) eingesetzt (Prasuhn et al. 2009). Die Entnahme von Bodensäulen mit ungestörter Bodenstruktur wird dabei ohne Einsatz schwerer Gewinnungstechnik ermöglicht. Sie erfolgte an drei verschiedenen Standorten mit typischen Ackerböden der Schweiz (48 Monolithe in Grafenried: sandig-lehmige Braunerde über Grundmoräne (Abb. 4); 12 Monolithe in Schafisheim: lehmige Parabraunerde über Schotter (Abb. 5); 12 Monolithe in Zürich-Reckenholz: lehmig-schluffige, pseudovergleyte Braunerde über Grundmoräne (Abb. 6)). Noch vor Ort wurden die gewonnenen Monolithe basal verfiltert, so dass die reale Bodentiefe 135 cm beträgt. Zum Einsatz kam ein dreistufiger

Filteraufbau in den Korngrößen 0,1-0,5 mm; 0,71-1,25 mm; 3,15-5,6 mm. Das zertifizierte Quarzsand-Filtermaterial ist inert und durch Glühen und Waschen so gereinigt, dass die Sickerwässer in ihrer stofflichen Zusammensetzung nicht verfälscht werden.

Die Lysimeter-Instrumentierung ist entsprechend der Aufgabenstellung in zwei technisch unterschiedliche Ausstattungsniveaus ausgeführt. Die 60 nur für die Sickerwassererfassung vorgesehenen Lysimeter sind mit 100 ml-Kippwaagen ausgestattet und registrieren die Sickerwassermenge. Gleichzeitig wird eine Teilprobe für die chemischen Wasseranalysen in einer separaten Probenflasche gewonnen.

Die 12 wägbaren Lysimeter, deren Monolithe alle drei Standorte repräsentieren, sind zusätzlich mit kompletter bodenhydrologischer Messtechnik ausgestattet, um alle Parameter des Wasser- und Stoffhaushalts zu erfassen. In vier Messebenen (10, 30, 60 und 90 cm) werden mit zweifacher Wiederholung die Bodensaugspannung (Tensiometer) sowie die Bodenfeuchte (FDR-Sonden) und Bodentemperatur kontinuierlich erfasst und alle fünf Minuten aufgezeichnet. Eine Saugkerzenanlage ermöglicht für jedes Lysimeter eine tiefen- und

tensionsabhängige Perkolatentnahme. Die Sickerwasserrate wird wiederum mittels Kippwaagen realisiert. Niederschlag und Evapotranspiration werden durch eine hochpräzise Wägung ermittelt. Die Wasserbilanz wird dadurch messtechnisch geschlossen darstellbar.

Alle Lysimeter werden für agronomische Versuche genutzt. Im Vordergrund stehen Untersuchungen zum Sickerwassertransport (Tracerversuche) und zur Nitratauswaschung bei verschiedenen Anbausystemen, Bodenbearbeitungsverfahren, Düngungsvarianten und Bodentypen. Die meisten Versuche werden in dreifacher Wiederholung durchgeführt.



Abb. 3: Lysimeteranlage Reckenholz ober- und unterirdisch.

Laufende oder abgeschlossene Versuche (Germann und Prasuhn 2018; Oberholzer et al. 2017; Spiess et al. 2015 und 2017):

- Einfluss von Höhe und Art der N-Düngung (0, 50, 100, 200% von N-Normdüngung, Cultan-Düngung)

- Vergleich Biolandbau und Integrierte Produktion (IP)
- Einfluss unterschiedlicher Bodenbearbeitung (Pflug - Mulchsaat)
- Einfluss des Umbruchtermins von Zwischenkulturen (Herbst - Frühjahr)
- Einfluss des Umbruchtermins verschiedener Klee-graswiesen (Herbst - Frühjahr)
- Einfluss verschiedener Saattermine bei unterschiedlichen Zwischenkulturen
- Risiken von Gülledüngung im Winter
- Recyclingdünger im Biolandbau
- Grasreferenzverdunstung

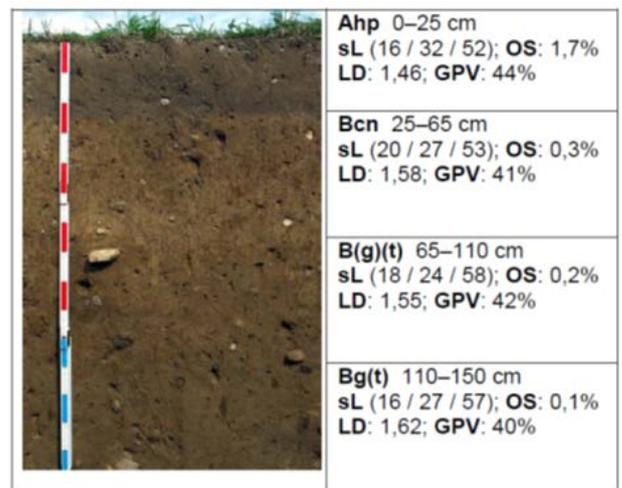


Abb. 4: Braunerde (Grafenried BE), schwach pseudogleyig, tonhüllig; skeletthaltig, sandiger Lehm, sehr tiefgründig.

cn = Mangan- und Eisenknötchen
(g) = schwache Rostflecken
(t) = schwache Tonanreicherung
g = rostfleckig, wechsellässige Zone

	Ahp 0–27 cm sL (18 / 28 / 54); OS: 2,0% LD: 1,50; GPV: 43%
	BE 27–60 cm L (22 / 31 / 47); OS: 0,7% LD: 1,53; GPV: 43%
	Bit 60–85 cm L (26 / 19 / 55); OS: 0,6% LD: 1,47; GPV: 45%
	It,cn 85–110/125 cm L (28 / 23 / 49); OS: 0,4%
	BC/C 110/125–150 cm L (24 / 21 / 55)

Abb. 5: Lysimeteranlage Abb. 3: Parabraunerde (Schafisheim AG); schwach skeletthaltig über skelett-reich, sandiger Lehm über Lehm, tiefgründig.

E = Auswaschungshorizont

I = Einwaschungshorizont

t = Tonanreicherung

cn = Mangan- und Eisenknötchen

	Ahp 0–25 cm L (25 / 50 / 25); OS: 2,5% LD: 1,36; GPV: 48%
	ABcn 25–32 cm IU (24 / 54 / 22); OS: 1,9%
	Bcn(g)(x) 32–65 cm tL (31 / 50 / 19); OS: 0,7% LD: 1,44; GPV: 47%
	Bg 65–85 cm tL (33 / 46 / 21); OS: 0,6%
	BCg 85–105 cm IU (19 / 61 / 20); OS: 0,2% LD: 1,39; GPV: 49%
	Cg 105/–150 cm IU (18 / 65 / 17) LD: 1,61; GPV: 41%

Abb. 6: Lysimeteranlage Abb. 4: Braunerde (Reckenholz ZH), pseudogleyig; skelettarm, Lehm über tonigem Lehm, tiefgründig

AB = Übergangshorizont

cn = Mangan- und Eisenknötchen

(g) = schwache Rostflecken

(x) = kompakte, dichte Zone

g = rostfleckige, wechsellasse Zone

BC = Übergangshorizont

Literatur

www.lysimeter.ch

Germann, P., Prasuhn, V. (2018): Viscous flow approach to rapid infiltration and drainage in a weighing lysimeter. - Vadose Zone J. 17:170020.

doi:10.2136/vzj2017.01.0020

Oberholzer, S., Prasuhn, V., Hund, A. (2017): Crop Water Use under Swiss Pedoclimatic Conditions – Evaluation of Lysimeter Data Covering a Seven-Year Period. - Field Crops Research 211, 48-65.

Prasuhn V., Spiess E. und Seifarth M. (2009): Die neue Lysimeteranlage Zürich-Reckenholz. 13. Gumpensteiner Lysimeter-tagung, 11-16.

Spiess, E., Prasuhn, V., Humphrys, C. (2015): Einfluss des Umbruchtermins einer Zwischenfrucht auf die Nitratauswaschung. 16. Gumpensteiner Lysimeter-tagung, 171-174.

Spiess, E., Prasuhn, V., Humphrys, C. (2017): Einfluss des Umbruchtermins und des Alters einer Ansaatwiese auf die Nitratauswaschung. 17. Gumpensteiner Lysimeter-tagung, 87 – 92.

Exkursionspunkt 2: Zurich Organic Fertilisation Experiment (ZOFE)

Jochen Mayer

Das Zurich Organic Fertilisation Experiment (ZOFE) ist mit 70 Jahren der älteste Langzeitversuch der Schweiz. Es liegt direkt auf dem Gelände des Agroscope Standortes Zürich-Reckenholz (47°25'36" N, 8°31'08" E, Abb. 7). Die Jahresdurchschnittstemperatur beträgt 9.4°C, der mittlere Jahresniederschlag 1031 mm. Der Boden ist eine Parabraunerde mit 59% Sand, 23% Schluff und 18% Ton, 0.9% organischem Kohlenstoff und einer Bodendichte von 1.6 t m⁻³ im Pflughorizont.

Das Experiment wurde 1949 als „Humusdüngungsversuch“ gestartet und ist ein klassisches Düngungsexperiment. Es umfasst 12 Verfahren, die in einem systematischen Block-Design in fünf Wiederholungen (Parzellen 5 x 7 m) angelegt wurden:

1. Ungedüngte Kontrolle
2. Stallmist (Applikation 2 jährlich, 5000 kg organische Substanz ha⁻¹)
3. Getrockneter Klärschlamm (früher Agrosan) (Applikation jährlich 2500 kg organische Substanz ha⁻¹)
4. Getrockneter Kompost (früher Humotin) (Applikation jährlich 2500 kg org. Substanz ha⁻¹)
5. 50% PK + 100% N
6. Stallmist wie 2 + 100% PK
7. Klärschlamm wie 3 + 100% PK
8. Kompost wie 4 + 100% PK
9. Torfmull + 100% PK (Applikation alle 4 Jahre 10'000 kg org. Substanz ha⁻¹)
10. 100% PK
11. 100% NPK
12. 100% NPK + 60 kg Mg (Granumag)

Die Fruchtfolge umfasst acht Felder: 1. Klee-gras, 2. Klee-gras, 3. Winterweizen (Zwischenfutter), 4. Mais, 5. Kartoffeln, 6. Winterweizen (Zwischenfutter), 7. Mais, 8. Sommergerste. Vor Versuchsstart wurde die Fläche als Dauergrünland genutzt.

Der Versuch wird nach den Kriterien der integrierten konventionellen Landwirtschaft bewirtschaftet.



Abb. 7: Das Zurich Organic Fertilisation Experiment am Standort Zürich-Reckenholz

Der ZOFE dient heute als Forschungsplattform für unterschiedlichste Fragestellungen. In den letzten Jahren wurden Studien zu verschiedenen Themen durchgeführt:

- Entwicklung der Erträge und C-Vorräte im Boden (Oberholzer et al. 2014)
- Experimentelle Variabilität der ¹⁴C Gehalte im Boden – Implikationen für die Schätzung des C-Umsatzes (Leifeld und Mayer 2015)
- Effekt von organischer Düngung auf organische P-Fractionen (Annaheim et al. 2015)
- Effekt der von Gründüngern und organischer Dünger auf die Zn und Cd Aufnahme von Weizen (Grüter et al. 2017)
- Der Einfluss der Düngungsintensität auf die vertikale Verteilung der Wurzelbiomasse von Weizen und Mais (Hirte et al. 2018a)
- Netto-Primärproduktion und unterirdische C-Inputs von Weizen und Mais (Hirte et al. 2018b)
- Modellierung der C-Dynamik, Kalibrierung RothC-Modell (Cagnarini et al. 2019).



Abb. 8: $^{13}\text{CO}_2$ -Labelling von Mais und Winterweizen zur Bestimmung der C-Rhizodeposition im ZOFÉ.

Literatur

- Annaheim, K.E., Doolette, A.L., Smernik, R.J., Mayer, J., Oberson, A., Frossard, E., Bünemann, E.K., 2015. Long-term addition of organic fertilizers has little effect on soil organic phosphorus as characterized by ^{31}P NMR spectroscopy and enzyme additions. *Geoderma* 257-258, 67-77.
- Cagnarini, C., Renella G, Mayer, J., Hirte, J., Schulin, R., Costerousse, B., Della Marta, A., Orlandini, S., L. Menichetti, C., 2019. Multi-objective calibration of RothC using measured carbon stocks and auxiliary data of a long-term experiment in Switzerland. *European Journal of Soil Science*, in press.
- Grüter, R., Costerousse, B., Bertoni, A., Mayer, J., Thonar, C., Frossard, E., Schulin, R., Tandy, S., 2017. Green manure and long-term fertilization effects on soil zinc and cadmium availability and uptake by wheat (*Triticum aestivum* L.) at different growth stages. *Science of the Total Environment* 599-600, 1330-1343.
- Hirte, J., Leifeld, J., Abiven, S., Mayer, J., 2018a. Maize and wheat root biomass, vertical distribution, and size class as affected by fertilization intensity in two long-term field trials. *Field Crops Research* 216, 197-208.
- Hirte, J., Leifeld, J., Abiven, S., Oberholzer, H.R., Mayer, J., 2018b. Below ground carbon inputs to soil via root biomass and rhizodeposition of field-grown maize and wheat at harvest are independent of net primary productivity. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 265, 556-566.
- Leifeld, J., Mayer, J., 2015. ^{14}C in cropland soil of a long-term field trial - experimental variability and implications for estimating carbon turnover. *SOIL* 1, 537-542.
- Oberholzer, H.R., Leifeld, J., Mayer, J., 2014. Changes in soil carbon and crop yield over 60 years in the Zurich Organic Fertilization Experiment, following land-use change from grassland to cropland. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 177, 696-704.

Exkursionspunkt 3: Langzeitfeldversuch „Regeneration Bodenstruktur nach Bodenverdichtung“ (Soil structure observatory, SSO)

Thomas Keller, Peter Weisskopf

Die steigenden Maschinengewichte in der Landwirtschaft erhöhen das Risiko für Bodenverdichtung. Während der Einfluss von landwirtschaftlichen Maschinen auf Bodeneigenschaften relativ ausführlich untersucht wurde, ist noch wenig bekannt, wie schnell sich die Bodenstruktur von einer Verdichtung erholt und welche Mechanismen diese Regeneration wie beeinflussen.

Der **Langzeitfeldversuch „Regeneration Bodenstruktur nach Bodenverdichtung“** (Soil structure observatory, SSO) wurde 2014 am Standort Agroscope Zürich-Reckenholz auf einer tiefgründigen lehmigen Braunerde (Abb. 9) gestartet und soll u.a. folgende Fragestellungen beantworten: Wie schnell erholen sich Bodenfunktionen nach einer Verdichtung? Welche Mechanismen beeinflussen die Erholung? Welche Bewirtschaftungsmassnahmen können die Regeneration beschleunigen?

	Ahp 0–25 cm L (25 / 50 / 25); OS : 2,5% LD : 1,36; GPV : 48%
	ABcn 25–32 cm IU (24 / 54 / 22); OS : 1,9% Bcn(g)(x) 32–65 cm tL (31 / 50 / 19); OS : 0,7% LD : 1,44; GPV : 47%
	Bg 65–85 cm tL (33 / 46 / 21); OS : 0,6%
	BCg 85–105 cm IU (19 / 61 / 20); OS : 0,2% LD : 1,39; GPV : 49%
	Cg 105–150 cm IU (18 / 65 / 17) LD : 1,61; GPV : 41%

Abb. 9: Braunerde, pseudogleyig; skelettarm, Lehm über tonigem Lehm, tiefgründig

AB = Übergangshorizont

cn = Mangan- und Eisenknötchen

(g) = schwache Rostflecken

(x) = kompakte, dichte Zone

g = rostfleckige, wechsellasse Zone

BC = Übergangshorizont

Der gemeinsame Versuch von Agroscope (Gruppe "Bodenqualität und Bodennutzung")

und ETH Zürich (Gruppen "Umweltphysik Terrestrischer Systeme" und "Kulturpflanzenwissenschaften") wurde im Rahmen des Nationalen Forschungsprogramms (NFP) 68 "Resource Boden" des Schweizerischen Nationalfonds (SNF) gestartet.

Im März 2014 wurden **drei Verdichtungsverfahren** initiiert (Radlast rund 8 Tonnen, Reifendruck 3 bar): (1) ganzflächig verdichtet, (2) verdichtete Fahrspuren und (3) unverdichtete Kontrolle. Messungen zeigen, dass der Boden bis in ca. 50 cm Tiefe verdichtet wurde. Nach der Verdichtung wurden **vier Bewirtschaftungsverfahren** angelegt: (A) Schwarzbrache (natürliche Regeneration ohne Pflanzen und ohne Bodenbearbeitung), (B) Dauerwiese (natürliche Regeneration mit Pflanzen, ohne Bodenbearbeitung), (C) Fruchtfolge ohne mechanische Bodenbearbeitung und (D) Fruchtfolge mit mechanischer Bodenbearbeitung. Die Fruchtfolge seit 2014 ist Triticale (2014), Silomais (2015), Winterweizen (2016), Winterraps (2017), Wintergerste (2018).

Das Monitoring- und Messprogramm umfasst (i) quasi-kontinuierliche Messungen mittels in mehreren Bodentiefen eingebauter Sonden (Wassergehalt, Saugspannung, Temperatur, O₂ und CO₂ Konzentration in der Bodenluft, Redoxpotenzial und Sauerstoffdiffusionsraten; siehe auch Abb. 2), (ii) geophysikalische Messungen und (iii) periodische Beprobungen von Boden, Regenwürmern und Pflanzen.



Abb. 10: Installation von Bodensonden im Frühjahr 2014.

Erste Resultate bestätigen, dass die Regeneration der Bodenstruktur ein sehr langsamer Prozess ist und die Regenerationsrate mit zunehmender Tiefe abnimmt. Verschiedene Bodeneigenschaften werden unterschiedlich stark

durch die Verdichtung beeinflusst und zeigen unterschiedliche Regenerationsraten. Als Beispiel nahm die Luftdurchlässigkeit durch die Verdichtung um fast zwei Größenordnungen ab, erholt sich aber relativ schneller als zum Beispiel die Gasdiffusivität. Die Lagerungsdichte ändert sich gar nicht, außer durch mechanische Lockerung (Bodenbearbeitung). Auch wenn sich Tendenzen zu Regeneration erkennen lassen, sind die bodenphysikalischen Eigenschaften nach wie vor stark beeinträchtigt (siehe z.B. Abb. 11). Der Pflanzenertrag hat sich dagegen relativ schnell erholt, allerdings nicht vollständig: eine anhaltende Ertragseinbuße bleibt.



Abb. 11: Verfahren „verdichtete Fahrspuren“ in Kombination mit „Schwarzbrache“ zwei Jahre nach der Verdichtung.

Literatur

<http://www.sso.ethz.ch>

Keller T., Colombi T., Ruiz S., Manalili M.P., Rek J., Stadelmann V., Wunderli H., Breitenstein D., Reiser R., Oberholzer H.-R., Schymanski S., Romero-Ruiz A., Linde N., Weisskopf P., Walter A. & Or D. 2017. Long-term soil structure observatory for monitoring post-compaction evolution of soil structure. *Vadose Zone Journal*, 16(4), doi: 10.2136/vzj2016.11.0118.

Colombi T., Torres L.C., Walter A. & Keller T. 2018. Feedbacks between soil penetration resistance, root architecture and water uptake limit water accessibility and crop growth - a vicious circle. *Science of the Total Environment*, 626, 1026-1035.

Colombi T., Braun S., Keller T. & Walter A. 2017. Artificial macropores attract crop roots and enhance plant productivity on compacted soils. *Science of the Total Environment*, 574, 1283-1293.

Exkursionspunkt 4: Langzeitversuch FAST: Einflüsse unterschiedlicher Bewirtschaftungs- und Bodenbearbeitungssysteme auf Bodeneigenschaften und Pflanzenentwicklung

Raphael Wittwer, Marcel van der Heijden

Seit 2009 werden im FAST-Versuch (Farming System and Tillage Experiment) Langzeit-Effekte von 4 wichtigen Ackerbausystemen (konventionell* mit Pflugeinsatz, konventionell Direktsaat, BIO mit Pflugeinsatz und BIO Mulchsaat) auf die Produktivität (Erträge), verschiedene Ökosystemleistungen (Nährstoffzyklen, Erosionsschutz, Kohlenstoffspeicherung, Bodenqualität, Klimawirkung oder die Biodiversität), und die gesamtheitliche Leistung (auch Multifunktionalität genannt) untersucht. Zudem werden die agronomischen und ökologischen Auswirkungen von Zwischenfrüchten, Kulturen welche zwischen den Hauptkulturen angebaut werden, in den verschiedenen Systemen untersucht.

Der Vergleich der 4 Systeme basiert auf einer 6-jährigen Fruchtfolge (Weizen, Körnermais, Körnerleguminose, Weizen, 2-jährige Kunstwiese). In den konventionellen Verfahren (inkl. Direktsaat) werden Pestizide und mineralische Dünger eingesetzt, während in den biologischen Verfahren mit Gülle gedüngt wird und keine Pestizide eingesetzt werden. Im Direktsaat-Verfahren wird der Boden nicht bearbeitet und Glyphosat wird vor den Saaten für die Unkrautkontrolle eingesetzt. Die reduzierte Bodenbearbeitung in den biologischen Verfahren wird auf einer Tiefe von maximal 5-10cm durchgeführt, anfangs mit einer Kreiselegge und neuerdings mit einer Fräse (Winkelmesser) oder einem Geohobel (Rath Maschinen) auf einer Tiefe von 2-5cm. Die beiden gepflügten Verfahren werden auf einer Tiefe von 20-25cm bearbeitet.

Der Versuch ist als Split-plot Design mit 4 Wiederholungen angelegt und ist komplett um ein Jahr versetzt wiederholt, um jährliche Variationen zu berücksichtigen (Abb. 12).



Abb. 12: Luftbild des FAST-Versuches am 15.9.2017. Der Vergleich der 4 Systeme konventionell mit Pflugeinsatz, konventionell Direktsaat, organisch mit Pflugeinsatz und Mulchsaat basiert auf einer 6-jährigen Fruchtfolge (Weizen, Körnermais, Körnerleguminose, Weizen, 2-jährige Kunstwiese). © Raphaël Wittwer

Im FAST-Versuch hat sich bereits nach 4 Jahren gezeigt, dass sowohl der bodenkonservierende als auch der biologische Anbau sich positiv auf die Bodenqualität auswirken. Sie erzielen relativ schnell ökologische Vorteile, wie eine verbesserte Bodenstruktur (Puerta et al. 2018), ein angereichertes Bodenleben (Hartman et al. 2018), ein reduziertes Erosi-

onsrisiko (Seitz et al. 2018), eine erhöhte Biodiversität sowie eine geringere Klimawirkung (Prechsl et al. 2017). Zum Beispiel konnte mittels Berechnungssimulation direkt im Versuch belegt werden, dass durch eine Bodenbedeckung von mindestens 30% das Erosionsrisiko in bodenkonservierenden Systemen (Direktsaat, Mulchsaat) sich sehr effizient vermindert lässt. Zudem konnte beobachtet werden, dass die Kombination von BIO und reduzierte Bodenbearbeitung sich positiv auf nützliche Bodenorganismen, wie Mykorrhiza-Pilze und die Bodenstruktur auswirken. Auch das Treibhausgasemissionspotential konnte signifikant reduziert werden durch eine biologische Bewirtschaftung. Dabei wiegt der Einsatz von mineralischem Stickstoffdünger sehr stark auf die Bilanz der konventionellen Systeme und ist ein Schlüsselfaktor, um Emissionen zu vermindern.

Trotz klarer ökologischer Vorteile zeichnen sich konservierende und biologische Systeme auch durch eine geringere Produktivität aus. Somit wurden gegenüber dem Verfahren konventionell mit Pflugeinsatz und über die erste Fruchtfolge 6% geringere Erträge im Direktsaatsystem, 20% im biologischen Verfahren mit dem Pflug und sogar 36% in der BIO Variante mit Mulchsaat erzielt. Doch hier spielt der Einsatz von Zwischenfrüchten eine wichtige Rolle, um gegen diesen Zielkonflikt zu wirken. Es hat sich gezeigt, dass insbesondere stickstofffixierende Kulturen wie Wicken, Kleearten oder Erbsen (auch in Mischungen mit anderen Arten) in extensiveren Systemen fähig sind, die Erträge zu steigern (zum Teil bis 40% mehr Ertrag im Vergleich zum Verfahren ohne Zwischenfrucht im Bio Mulchsaatsystem) und somit Ertragsverluste zu vermindern (Wittwer et al. 2017). Zudem basieren diese Ergebnisse auf den ersten Jahren des Versuchs und das Entwicklungspotential von innovativen Systemen, wie das BIO Mulchsaatverfahren, sowie der langfristige Einfluss einer verbesserten Bodenqualität auf die Produktivität, muss noch untersucht werden. Zeichen hierfür sind die deutlich geringeren Unterschiede zwischen konventionell und BIO Pflug (-7%) und konventionell und BIO Mulchsaat (-26%) in den ersten

Jahren der zweiten Fruchtfolge (für Weizen und Körnermais).

Der FAST-Versuch ist eine Forschungsplattform, bei der komplexe Mechanismen über die Zeit untersucht werden können. Somit bietet der Versuch vielseitige Forschungsthemen, die für die zukünftige Gestaltung von Ackerbausystemen wichtig sein werden. Aktuell werden Untersuchungen zur Trockenheitsresistenz und zur Kohlenstoffspeicherung durchgeführt. Diese Fragen werden im Kontext des Klimawandels eine große Bedeutung haben. Der Versuch soll also Erkenntnisse für die Praxis liefern, aber auch als Entscheidungsgrundlage für Entscheidungsträger dienen.

Literatur

- Puerta, V. L., E. I. P. Pereira, R. Wittwer, M. van der Heijden, J. Six (2018). Improvement of soil structure through organic crop management, conservation tillage and grass-clover ley. *Soil and Tillage Research* 180: 1-9.
- Hartman, K., M. G. van der Heijden, R. A. Wittwer, S. Banerjee, J.-C. Walser, K. Schlaeppli (2018). Cropping practices manipulate abundance patterns of root and soil microbiome members paving the way to smart farming. *Microbiome* 6(1): 14.
- Seitz, S., P. Goebes, V. L. Puerta, E. I. P. Pereira, R. Wittwer, J. Six, M. G. A. van der Heijden, T. Scholten (2018). Conservation tillage and organic farming reduce soil erosion. *Agronomy for Sustainable Development* 39(1): 4.
- Prechsl, U. E., R. Wittwer, M. G. van der Heijden, G. Lüscher, P. Jeanneret, T. Nemecek (2017). Assessing the environmental impacts of cropping systems and cover crops: Life cycle assessment of FAST, a long-term arable farming field experiment. *Agricultural Systems* 157: 39-50.
- Wittwer, R. A., B. Dorn, W. Jossi, M. G. Van Der Heijden (2017). Cover crops support ecological intensification of arable cropping systems. *Scientific reports* 7: 41911.

Exkursionspunkt 5: Pflanzenschutzmittel-Analytik der Gruppe Organische Spurenanalytik

Thomas Bucheli, Felix Wettstein, Simon Mangold

Im September 2017 wurde vom Bundesrat der Aktionsplan (AP) Pflanzenschutzmittel (PSM) verabschiedet. Darin festgelegt sind unter anderem Maßnahmen zur Reduktion von PSM. Um für das Umweltkompartiment Boden Diskussionsgrundlagen zu schaffen und in Zukunft Erfolgskontrollen durchzuführen, werden in unserem Labor PSM-Gehalte in Schweizer Böden im Rahmen der Nationalen Bodenbeobachtung (NABO) durchgeführt. Die Messungen erfordern drei grundlegende analytische Techniken:

- Im landwirtschaftlichen Kontext liegen die Zielanalyten meist sorbiert an Bodenpartikel oder gebunden in Biomasse vor. Durch eine **Extraktion** werden diese von Boden oder Pflanzen extrahiert und in Lösung gebracht. Gängige Methoden sind die Accelerated Solvent Extraction (ASE); (Abb. 13), QuE-ChERS (Quick, Easy, Cheap, Efficient, Rugged, Safe) oder die Soxhlet-Extraktion.



Abb. 13: Thermo Fischer ASE350 zur Extraktion von PSM aus Bodenproben

- In Umweltproben und Extrakten ist immer eine Vielzahl von Nichtzielanalyten (Matrix) vorhanden, die die Messung

der Zielsubstanzen stören können oder sogar verunmöglichen. Gleichzeitig sind häufig viele Substanzen in einer Probe von Interesse (über 250 organisch-synthetische, in der Schweiz zugelassene PSM). Dies erfordert eine Probenaufreinigung und -auftrennung. Hierfür kommen chromatographische Verfahren zum Einsatz. In unserem Labor sind das in erster Linie **flüssig- und gaschromatographische Verfahren**.



Abb. 14: Agilent LC-System und AB Sciex-QTRAP 5500 TQ Massenspektrometer

- Für die Detektion und Quantifizierung der Zielanalyten werden oft einfache UV-Detektoren eingesetzt. Für komplexere Aufgaben, beispielsweise wenn mehrere Analyten gleichzeitig von der chromatografischen Säule eluieren, werden jedoch massenselektive Detektoren benötigt. In unserem Fall sind das Single Quadrupole und Triple Quadrupole (TQ) **Massenspektrometer** (MS); (Abb. 14).

In der aktuell angewendeten PSM-Methode wird der Gehalt von 38 PSM (14 Herbizide, 17 Fungizide, 7 Insektizide) und 8 ihrer Abbauprodukte in Bodenproben bestimmt. Durch die Zugabe von 23 isotopenmarkierten Standards können aufarbeitungs- oder matrixbedingte Verluste und Effekte kompensiert werden. Dies ermöglicht eine einfachere und zügigere Auswertung und erlaubt eine robuste Quantifizierung.

Die Extraktion erfolgt mittels ASE (Abb. 13) in zwei Extraktionsschritten. Die chromatographische Trennung erfolgt über eine Flüssigkeits-Chromatographie-Säule mit einem Etha-

nol/Wasser-Gradienten als mobile Phase. Die für die massenspektrometrische Messung benötigten Analyt-Ionen werden im Elektrospray (Ionenquelle) erzeugt und anschliessend in einem Triple Quadrupole (TQ) Massenspektrometer detektiert (Abb. 14). Instrumentenmethodisch wird ein dynamic Multiple Reaction Monitoring (dMRM, siehe Abb. 15) durchgeführt. Dies erlaubt sich überschneidende Retentionszeitfenster und die gleichzeitige Erfassung mehrerer Massenübergänge.

TQ Massenspektrometer sind deutlich sensitiver als einfache Single Quadrupol Geräte. Damit werden mit diesem instrumentellen Auf-

bau und je nach Substanz bei entsprechender Probenaufbereitung Nachweisgrenzen von 0.05 bis 1 µg/kg erreicht. Aufgrund des bisherigen Kenntnises sind damit die für eine Risikobeurteilung relevanten Konzentrationsbereiche bzw. Umweltstandards abgedeckt.

Die Analytik in unserem Labor ist jedoch nicht nur auf Pflanzenschutzmittel beschränkt. Unterschiedlichste Stoffgruppen werden in verschiedenen Projekten analysiert. Östrogene aus der Viehhaltung werden beispielsweise untersucht genauso wie Phytotoxine und deren Vorkommen in Oberflächengewässern.

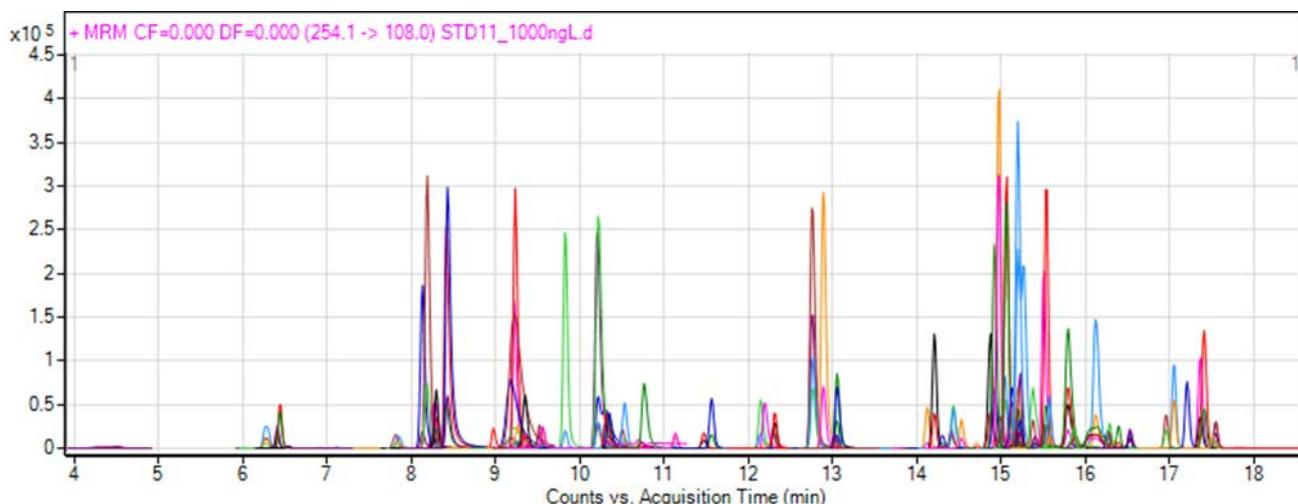


Abb. 15: Chromatogramm einer dMRM Methode zur Messung von PSM und anderen Mikroverunreinigungen.

Des Weiteren untersuchen wir nicht nur umweltgefährliche Substanzen, sondern auch Substanzklassen, die sich als Werkzeuge zur Beurteilung von Bodenparametern nutzen lassen. So können mit der Messung und Quantifizierung von Phospholipiden Rückschlüsse auf die Zusammensetzung der Bodenbiologie gezogen werden.

Literatur

- Bericht des Bundesrates vom 6. September 2017: Aktionsplan zur Risikoreduktion und nachhaltigen Anwendung von Pflanzenschutzmitteln. Online aufgerufen am 15.01.2019 unter: <https://www.news.d.admin.ch/news/detail/message/attachments/49600.pdf>.
- Chiaia-Hernandez, A. C. et al (2017), Long-Term Persistence of Pesticides and TPs in Archived Agricultural Soil Samples and Comparison with Pesticide Application. *Environ. Sci. Technol.* 51 (18): 10642-10651.

Exkursionspunkt 6: Molekulare Ökologie: Mikrobielle Diversität in Böden

Franco Widmer

Die Labore der Molekularen Ökologie werden am Agroscope-Standort Reckenholz als Userlab betrieben und von verschiedenen Forschungsgruppen für molekulargenetische Arbeiten genutzt. Ein wichtiger Teil dieser Arbeiten fokussiert auf die Analyse von mikrobiellen Gemeinschaften in natürlichen Böden und der Faktoren, welche die Diversität und Zusammensetzung dieser Gemeinschaften bestimmen. Da viele Mikroorganismen nicht mit einheitlichen Standardmethoden kultivierbar sind, wählen wir für unsere Untersuchungen einen kultivierungsunabhängigen Ansatz. Dabei wird die gesamte Erbsubstanz (DNS) der mikrobiellen Gemeinschaft aus dem Boden isoliert und, basierend auf der Analyse von bestimmten Markergenen, die Diversität und Zusammensetzung der Gemeinschaften bestimmt. Dadurch erhalten wir ein umfassendes Bild der äußerst komplexen mikrobiellen Gemeinschaften im Boden, die oft mehrere tausend Arten in einer Probe umfassen können. Das langfristige Ziel dieser Arbeiten ist es, die Information über die Zusammensetzung der mikrobiellen Gemeinschaften im Boden zu verstehen, sie modellieren zu können und für die Beurteilung der Bodenqualität zu nutzen.

Für solche Untersuchungen wurde ein Analyseablauf etabliert, welcher sich in drei Stufen unterteilen lässt. In der ersten Stufe werden die frischen Bodenproben aufgearbeitet und für die Lagerung bei -20°C vorbereitet. Dies erlaubt gesammelte Proben für die nächsten Stufen im Analyseablauf zu konservieren. In dieser zweiten Stufe werden die Proben molekulargenetisch analysiert, was mit der Extraktion der Erbsubstanz aus den Bodenproben beginnt. Üblicherweise nutzen wir dafür etwa ein halbes Gramm Boden und eine Kugelmühle mit Glasperlen, um die mikrobiellen Zellen im Boden aufzuschließen. Um die extrahierte DNS molekularbiologisch analysieren zu können, wird sie aufgereinigt und deren Menge quantifiziert. Die aus dem Boden extrahierte DNS-Menge kann als Anhaltspunkt für die im Boden vorhandene mikrobielle Biomasse ge-

nutzt werden (Hartmann et al. 2005). Mithilfe der Polymerase Kettenreaktion (engl. PCR) können dann spezifische genomische Marker aus der Boden-DNS isoliert werden. Diese Marker sind so gewählt, dass sie die Diversität widerspiegeln und damit z.B. die gesamte Gemeinschaft der Bakterien oder jene der Pilze abbilden. Diese Markergene werden danach mit Hochdurchsatz-DNS-Sequenzierung entschlüsselt, was in einem Durchgang etwa 12 Mio. DNS-Sequenzen liefert und die mikrobiellen Gemeinschaften in hoher Auflösung abbildet. Hier beginnt dann die dritte Stufe des Analyseablaufs, bei welchem die große Datenmenge bioinformatisch bearbeitet und statistisch ausgewertet wird. Dabei werden die Sequenzen zuerst einem Qualitätscheck unterzogen und dann aufgrund ihrer Ähnlichkeit in sogenannte operationelle taxonomische Einheiten (engl. OTU) eingeteilt. Datenbanken werden genutzt, um den OTUs, wo möglich, eine reale taxonomische Zuordnung zu geben. Diese Information wird dann bei der Interpretation der Daten verwendet, da man über die Taxonomie auch Informationen zu möglichen Funktionen der Mikroorganismen gewinnen kann (Hartmann et al. 2015).

Bei der Exkursion werden wir das Labor und den Analyseablauf kurz darstellen und aufgrund von Beispielen die erhaltenen Daten diskutieren. Wir haben Resultate zu Zeitverläufen, Bodennutzung und verschiedenen Bodentypen aus Schweizerischen Monitoringsystemen und Feldversuchen, welche die Aussagekraft der Daten darstellen.

Literatur:

- Hartmann M., Frey B., Kölliker R., Widmer F. (2005). Semi-automated genetic analyses of soil microbial communities: comparison of T-RFLP and RISA based on descriptive and discriminative statistical approaches. *Journal of Microbiological Methods* 61, 349-360.
- Hartmann M., Frey B., Mayer J., Mäder P., Widmer F. (2015). Distinct soil microbial diversity under long-term organic and conventional farming. *ISME Journal* 9, 1177-1194.

Exkursionspunkt 7: Nationale Bodenbeobachtung NABO: Verschiedene Messsysteme im Langzeitmonitoring von Böden der Schweiz

Peter Schwab

Zur landesweiten Erfassung der Bodenqualität und der Früherkennung von unerwünschten

Veränderungen betreibt die NABO seit 1985 an über 100 Standorten ein nationales Referenznetz. Dieses deckt ein breites Spektrum von Böden und Nutzungsformen der Schweiz ab.

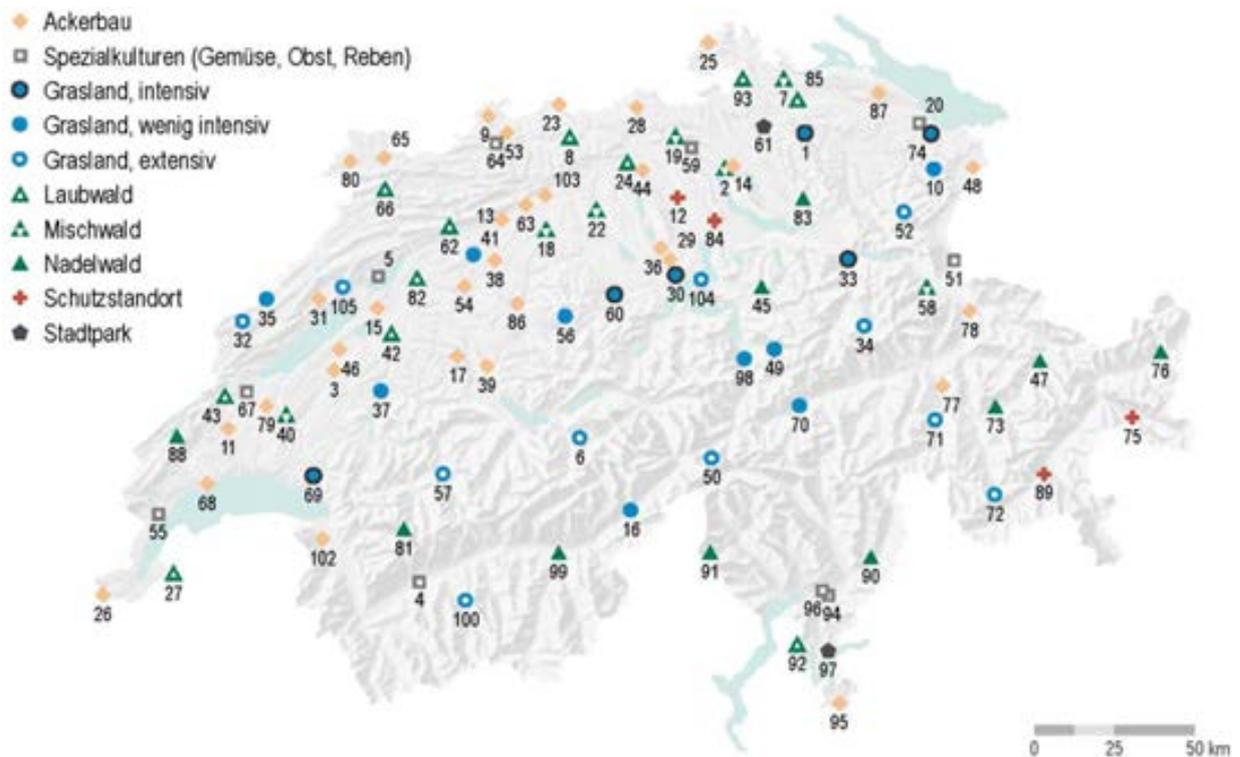


Abb. 16: NABO-Dauerbeobachtungsstandorte und ihre Nutzung

Die Probenahme erfolgt in einem 5-jährigen Zyklus auf eingemessenen und mit Magneten versicherten Beprobungsflächen von je 100 m². Stünden zu Beginn die Schwermetalle im Fokus, hat sich das Monitoring-Programm in den letzten Jahren sukzessive inhaltlich und methodisch an neue Fragestellungen angepasst. Heute werden verschiedene Probenahme- und Messsysteme angewendet, um Aussagen über den Zustand und die Veränderungen der chemischen, biologischen und physikalischen Eigenschaften der untersuchten Standorte zu erhalten.



Abb. 17: Probenahme an einem Graslandstandort.

Aus frischen **Flächenmischproben** (0-20 cm Tiefe) werden biologische Parameter bestimmt. Aus getrockneten oder tiefgekühlten Proben werden anorganische bzw. organische Stoffe analysiert. Seit 2003 werden bei jeder Erhebung zusätzlich physikalische Begleitparameter der Tiefe 0-20 cm wie Wassergehalt, Skelettanteil, Raumgewicht und Lagerungsdichte aus Volumenproben bestimmt.

Seit 2010 werden Bohrkern bis 100 cm Tiefe untersucht. Daraus können einerseits der Bodenaufbau und die Variabilität in der Fläche bestimmt werden. Andererseits werden aus diesen volumetrischen Proben die Stoffvorräte horizontweise über das gesamte Profil bestimmt und allfällige zeitliche Veränderungen nachgewiesen.



Abb. 18: Je vier Bohrkern von drei NABO-Standorten

An ausgewählten Standorten werden seit 2012 jährlich **mikro- und molekularbiologische** und seit 2014 **physikalische Parameter** bestimmt. Durch profilumfassende Messungen des Eindringwiderstandes (PANDA-Sonde) und physikalischer Begleitparameter, sowie durch Beurteilung des Gefügestandes (VESS) werden verdichtete Zonen bei rund 40 landwirtschaftlich genutzten Standorten periodisch erfasst und die zeitliche Entwicklung beobachtet.

An 50 landwirtschaftlich genutzten Standorten werden die relevanten Ein- und Austräge von Schadstoffen durch Mineraldünger, Pflanzenschutzmittel (PSM), atmosphärischen Eintrag und Ernteentzug erfasst. Damit können die Schadstoffeintragspfade ermittelt und quantifiziert werden, zudem lassen sich damit Auswirkungen der Bewirtschaftung (Fruchtfolge, Düngung, PSM, Bodenbearbeitung) auf die biologischen und physikalischen Eigenschaften der Böden untersuchen.

An der Exkursion werden Konzept, Probenahme- und Messmethoden der Nationalen Bodenbeobachtung NABO an einem Untersuchungsstandort vorgestellt. Weitere Themen sind:

- Bedeutung und Wahrung der Methodenstabilität der Langzeitbeobachtung in einem sich ändernden Umfeld.
- Umgang mit Veränderungen im Beobachtungsprogramm.
- Aussagesicherheit und Synergien durch interdisziplinäre bzw. ganzheitliche Ansätze.



Literatur

- 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. Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Zustand Nr. 1507: 81 S. www.bafu.admin.ch/uz-1507-d
- Hug A.-S., Gubler A., Gschwend F., Widmer F., Oberholzer H., Frey B., Meuli R.G. (2018): NABO-bio - Bodenbiologie in der Nationalen Bodenbeobachtung, Ergebnisse 2012-2016, Handlungsempfehlungen und Indikatoren. Agroscope Science, 63, 2018, 1-55. www.agroscope.ch/science
- Schwab P. und Gubler A. (2016): Methoden zur Bestimmung physikalischer Begleitparameter an Bodenproben. Agroscope Science, 40, 2016, 1-34. www.agroscope.ch/science
- Schwab P., Dietrich M., Gubler A. (2018): Messung des Eindringwiderstandes und des Bodenwasserzustandes - Methodenvergleich verschiedener Geräte und Verfahren. www.nabo.admin.ch



Deutsche Bodenkundliche Gesellschaft

EXKURSIONS- FÜHRER

Bern 2019

DBG • Band 119 • 2019 • ISSN – 0343-1071

Schriftleitung: S. Spielvogel, Kiel/Bern und Chr. Ahl, Göttingen

Schriftleitung

Prof. Dr. Sandra Spielvogel

Institute for Plant Nutrition and Soil Science

Department Soil Science

Christian Albrechts University Kiel

Hermann-Rodewald-Straße 2

D-24118 Kiel

fon: +49 431 880 7411

email: s.spielvogel@soils.uni-kiel.de

Dr. Christian Ahl

DBG Geschäftsstelle

Am Bärenberg 70

37077 Göttingen

dbg@dbges.de

ISSN – 0343-1071

