

Die Nationale Boden- beobachtung 2021

Autorinnen und Autoren

Andreas Gubler, Thomas Gross, Anna-Sofia Hug, Janine Moll-Mielewczik, Michael Müller, Kirsten Rehbein, Peter Schwab, Daniel Wächter, Ramon Zimmermann, Reto Giulio Meuli



Impressum

Herausgeber	Agroscope Rte de la Tioleyre 4, Postfach 64 1725 Posieux www.agroscope.ch
Auskünfte	www.nabo.ch
Konzept & Umsetzung	Andreas Gubler
Redaktion & Lektorat	Paul Knüsel, Zürich
Übersetzung Französisch	André Carruzzo, Carruzzo Traduction, Genf
Gestaltung	Andreas Gubler
Fotos	NABO
Titelbild	Agroscope
Download	www.nabo.ch Dieser Bericht ist auch in Französisch verfügbar.
Copyright	© Agroscope 2022
ISSN	2296-729X
DOI	https://doi.org/10.34776/as128g

Haftungsausschluss

Die in dieser Publikation enthaltenen Angaben dienen allein zur Information der Leser/innen. Agroscope ist bemüht, korrekte, aktuelle und vollständige Informationen zur Verfügung zu stellen – übernimmt dafür jedoch keine Gewähr. Wir schliessen jede Haftung für eventuelle Schäden im Zusammenhang mit der Umsetzung der darin enthaltenen Informationen aus. Für die Leser/innen gelten die in der Schweiz gültigen Gesetze und Vorschriften, die aktuelle Rechtsprechung ist anwendbar.

Inhalt

Zusammenfassung	5
Résumé	6
Summary	7
1 Mehr als drei Jahrzehnte Nationale Bodenbeobachtung NABO	8
2 Ein interdisziplinäres Fallbeispiel: Wie spielen unterschiedliche Bodenanalysen zusammen?	12
3 Den Bodenlebewesen auf der Spur: das bodenbiologische Monitoring	16
3.1 Biologische Summenparameter reagieren auf Veränderungen	16
3.2 Molekulargenetische Methoden weisen standorttypische Lebensgemeinschaften nach	16
4 Bodenbiologische Daten optimal nutzen: Gemeinsame Auswertung von drei kantonalen Messnetzen und der NABO	20
4.1 Vergleich der Messwerte, unter Berücksichtigung der Standorteigenschaften	20
4.2 Über Beurteilungsklassen zum Zustandsindikator Q	22
5 Bodenphysik: Die Struktur des Bodens erzählt viel über seine Eigenschaften	24
5.1 Physikalische Begleitparameter dokumentieren die Probenahme	24
5.2 Messungen mit dem Penetrometer – je dichter der Boden, desto grösser der Widerstand	24
5.3 Böden besser verstehen, dank physikalischer Begleitparameter	27
6 Stoffflüsse: Bilanzierungen ergänzen die Probenahme vor Ort	28
6.1 Teilweise deutliche Überschüsse an Kupfer und Zink	29
6.2 Hauptsächlichliche Einträge über Hofdünger und Pflanzenschutzmittel	30
7 Hofdünger: Analysen verbessern die Stoffflussbilanzen	32
7.1 Zwei NABO-Messkampagnen bestätigen die grosse Variabilität	33
8 Schwermetalle: Neueste Erhebungen bestätigen positive und negative Trends	35
8.1 Blei und Quecksilber: weiterhin rückläufige Gehalte im Boden	35
8.2 Kupfer und Zink: eine Zunahme der Gehalte im Boden	37
8.3 Kupfer und Zink: Woher stammen die zunehmenden Einträge?	39
8.4 Ein Fazit nach drei Jahrzehnten: Schwermetalle bleiben für die Bodenbeobachtung relevant	40
9 Die organische Substanz des Bodens: auch für den Klimaschutz relevant	41
9.1 Ackerland: grosse Variabilität, aber insgesamt stabil	42
9.2 Grasland: Böden mit geringen Schwankungen im C _{org} -Gehalt	43
10 Pflanzenschutzmittel: ein brisantes Thema nüchtern betrachtet	45
10.1 Erste Einblicke: ein Screening von Pflanzenschutzmitteln im NABO-Messnetz	45
10.2 Aktionsplan Pflanzenschutzmittel: mehr Wirkstoffe und mehr Standorte	47
11 Biodiversitätsmonitoring: Die Zusammenarbeit mit der Nationalen Bodenbeobachtung ist gefragt	49
11.1 Schweizweiter Datensatz mit über tausend Bodenproben	49
11.2 Grundlagen für weitere Untersuchungen	51

12	Zusammenarbeit in Europa: eine gemeinsame Statusuntersuchung mit den EU-Ländern.....	52
12.1	Ein erster Vergleich mit den Nachbarländern zeigt deutliche Unterschiede	53
12.2	Empfehlungen für eine harmonisierte Probenahme	55
13	Bodeninformationssystem NABODAT: NABO macht wertvolle Monitoring-Daten aus mehr als drei Jahrzehnten verfügbar	56
14	Dank	58
15	Referenzen.....	59
16	Anhang.....	63
16.1	Neue Standorte im NABO-Messnetz	63
16.2	Was sind «zentrierte Daten»?.....	63
16.3	Tabellen zum Ländervergleich des LUCAS-Soil-Datensatzes	64

Zusammenfassung

Seit mehr als drei Jahrzehnten untersucht die Nationale Bodenbeobachtung NABO die Qualität von Böden in der Schweiz und ihre Entwicklung über die Zeit. Dieser Bericht gibt Einblicke in das Arbeitsprogramm der NABO und stellt aktuelle Erkenntnisse anhand ausgewählter thematischer Aspekte kurz und prägnant vor. Am Schluss der einzelnen Kapitel findet sich eine Zusammenstellung von Links und weiterführenden Informationsquellen, die der Leserschaft eine thematische Vertiefung erlauben.

Der Bericht deckt sämtliche Aufgabenbereiche der NABO thematisch geordnet ab: Das bodenbiologische Monitoring NABObio, das seit 2012 betrieben wird, gibt Einblicke in die Welt der Bodenlebewesen (Kapitel 3). Das Kapitel 4 beschreibt, wie die Daten zur Bodenbiologie gemeinsam mit den Daten kantonaler Messnetze ausgewertet werden können. Weiter wird aufgezeigt, wie in den letzten Jahren auch physikalische Bodeneigenschaften in die Bodenbeobachtung aufgenommen wurden (Kapitel 5). Die Kapitel 6 bis 9 beschäftigen sich mit chemischen Bodeneigenschaften. Darin werden umfassende Resultate für die organische Bodensubstanz und die Belastung mit Schwermetallen präsentiert, die aus den bisherigen sechs Erhebungsrunden (2010 – 2014) vollständig und aus der siebten Runde (2015 – 2019) teilweise vorliegen. Befunde aus den Messungen von Pflanzenschutzmitteln und die bereits in Angriff genommenen Arbeiten für den Aktionsplan Pflanzenschutzmittel des Bundes werden im Kapitel 10 thematisiert.

Wie Kapitel 6 verdeutlicht, ergänzt die NABO ihre Messdaten mit Informationen zur Bewirtschaftung der Erhebungsstandorte und schätzt daraus flächenbezogene Ein- und Austräge für Nähr- und Schadstoffe ab. Als Datengrundlage dienen dazu unter anderem eigene Analysen des vor Ort eingesetzten Hofdüngers (Kapitel 7).

Die zahlreichen und vielfältigen Aktivitäten im NABO-Messnetz werden durch spezifische Untersuchungen, häufig in Zusammenarbeit mit externen Partnern, ergänzt. Dazu stellt der Bericht die schweizweite Beprobung von Böden in Zusammenarbeit mit dem Biodiversitätsmonitoring Schweiz vor (Kapitel 11). Ebenfalls erklärt ist, welche Ergebnisse die Teilnahme des NABO an der europaweiten LUCAS-Soil-Messkampagne 2015 hervorgebracht hat (Kapitel 12).

Die qualitativ hochwertigen Messdaten der NABO werden seit 2020 auch im nationalen Bodeninformationssystem NABODAT gespeichert und regelmässig aktualisiert. Das abschliessende Kapitel 13 führt aus, dass NABODAT diese Daten im Nationalen Bodendatensatz veröffentlicht und allen Interessierten frei zur Verfügung stellen kann.

Résumé

L'Observatoire national des sols NABO étudie depuis plus de trois décennies la qualité des sols en Suisse et son évolution dans le temps. Ce rapport donne un aperçu du programme de travail du NABO et propose une présentation concise de connaissances actuelles à travers des aspects thématiques choisis. À la fin de chaque chapitre, une liste de liens et de sources d'informations permet aux lecteurs d'approfondir certains sujets.

Le rapport couvre l'ensemble du domaine d'activité du NABO dans un ordre thématique : le monitoring de la biologie du sol NABObio, lancé en 2012, donne un aperçu du monde des organismes du sol (chapitre 3). Le chapitre 4 décrit comment les données sur la biologie du sol peuvent être interprétées conjointement avec celles de réseaux de mesure cantonaux. Le rapport montre également comment les propriétés physiques des sols ont été intégrées dans l'observation au cours des dernières années (chapitre 5). Les chapitres 6 à 9 sont consacrés aux propriétés chimiques du sol. On y trouve une présentation élargie de résultats concernant la matière organique et la pollution par les métaux lourds, interprétés sur la base des six anciens cycles de relevés et en partie du septième relevé (2015-2019). Le chapitre 10 présente les résultats de mesures des produits phytosanitaires ainsi que les travaux déjà engagés pour le plan d'action Produits phytosanitaires de la Confédération.

Comme l'explique le chapitre 6, le NABO complète ses données de mesure par des informations sur l'exploitation des sites étudiés, et évalue à partir de celles-ci les apports et exports de substances nutritives et de polluants. Le NABO s'appuie notamment sur ses propres analyses des engrais de ferme utilisés par les exploitations concernées (chapitre 7).

Les nombreuses activités menées dans le cadre du réseau de mesure du NABO sont complétées par des études spécifiques, souvent réalisées en collaboration avec des partenaires externes. Ainsi, le rapport présente l'échantillonnage des sols à l'échelle suisse effectué en collaboration avec le Monitoring de la biodiversité en Suisse (chapitre 11). Il décrit également les résultats de la participation du NABO à la campagne de mesures LUCAS-Soil menée dans l'ensemble de l'Europe (chapitre 12).

Depuis 2020, les données mesurées de haute qualité du NABO sont aussi enregistrées et régulièrement actualisées dans le système national d'information pédologique NABODAT. Le dernier chapitre (13) précise que le NABODAT publie également ces données dans le Fichier de données pédologiques et peut les mettre à la disposition de tous les intéressés.

Summary

For more than three decades, the Swiss Soil Monitoring Network NABO has been assessing the soil quality in Switzerland and its evolution. This report provides insights into NABO's activities and presents recent findings for a broad range of subjects. At the end of each chapter you will find links to further sources that provide in-depth information on the presented topics.

This report covers the whole thematic range of NABO's activities: The soil biological monitoring NABObio, running since 2012, provides insights into the universe of soil biota (chapter 3). Chapter 4 describes, how data on soil biology of NABO and cantonal monitoring networks may be interpreted jointly. Furthermore, it is demonstrated how physical soil properties have been incorporated into NABO's soil monitoring during the last years (chapter 5). Chapters 6 to 9 deal with chemical soil properties. Comprehensive results on soil organic matter and the exposure to heavy metals are presented up to the sixth repetition of the survey (2010 – 2014), partly also for the seventh round (2015 – 2019). Results on analyses of plant protection products and the activities recently started in the framework of the national action plan on plant protection products are presented in chapter 10.

As pointed out in chapter 6, the data measured by NABO are complemented by soil management information recorded to derive inputs and outputs for nutrients and pollutants for the considered plots. Inter alia, analyses of the used farmyard manures serve as basis for these calculations (chapter 7).

The manifold activities within the monitoring network are supplemented by specific investigations, often in collaboration with external partners. In this report, the soil sampling campaign throughout Switzerland in collaboration with the Biodiversity Monitoring Switzerland is presented (chapter 11). In addition, the conclusions gained by NABO's participation in the European soil survey LUCAS-Soil in 2015 are described (chapter 12).

Since 2020, the valuable data acquired by NABO are stored and regularly updated in NABODAT, the national soil information system. As outlined in the final chapter 13, these data are provided through the national dataset on soils and are freely available for interested parties.

1 Mehr als drei Jahrzehnte Nationale Bodenbeobachtung NABO

Der Boden ist die Grundlage für die Land- und Forstwirtschaft und erfüllt wichtige Funktionen für die Umwelt und die Gesellschaft. Weil viele Veränderungen nicht rückgängig gemacht werden können, ist der natürlich gewachsene, intakte Boden ein knappes, nicht erneuerbares Gut. Die Nationale Bodenbeobachtung NABO erhebt seit über 35 Jahren, wie sich der Zustand des Bodens in der Schweiz entwickelt. Das Monitoring wird laufend an neue Fragestellungen angepasst, um qualitative Beeinträchtigungen frühzeitig zu erkennen.

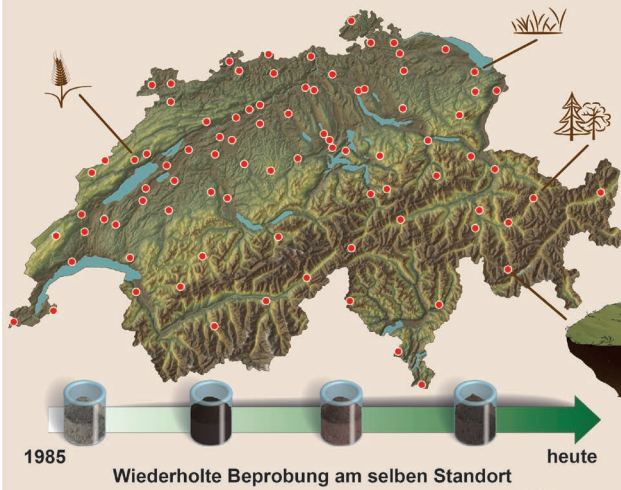
Der Boden ist eine multifunktionale Lebensgrundlage und ein knappes Gut. Intakte Böden sind eine unersetzbare Ressource für unser Leben: als Produktionsfaktor und Lebensraum, zur Regulierung des Wasser- und Nährstoffhaushalts und als Schadstofffilter. Doch die natürliche Ressource gerät unter Druck. Vielfältige Ansprüche gefährden die Böden, die aber in ausreichender Fläche und angemessener Qualität zu schützen sind. Ein sorgfältiger Umgang ist deshalb zwingend, damit künftige Generationen von den Bodenfunktionen profitieren und die Ökosystemleistungen in Anspruch nehmen können. Um eine nachhaltige Nutzung sicherzustellen, braucht es detaillierte und aktualisierte Kenntnisse über die Böden sowie Methoden, um künftige Entwicklungen zu prognostizieren: Wie ist der Zustand über einzelne Standorte hinaus zu bewerten und welche Entwicklungen sind zu erwarten?

Der Boden ist Informationsträger und Beobachtungsstandort. Für das Management von Umweltressourcen in der Land- und Forstwirtschaft sowie in der Raumplanung fehlt es den Entscheidungsträgern häufig an bodenrelevanten Informationen. Ebenso wichtig sind Bodeninformationen für die Bewertung von Naturgefahren, den Hochwasserschutz und die Auswirkungen des Klimawandels. Wer sich folglich ein genaues Bild über den Zustand der Böden verschaffen will, hat sehr vielfältige Aspekte zu berücksichtigen. Deshalb sind unterschiedlichste Fachinformationen und Kennwerte zu erheben und zu einem Gesamtbild zusammenzutragen. Der Bericht «Bedürfnisse der Kantone und des Bundes rund um ein Monitoring der Ressource Boden» (Gubler et al. 2020) zeigt, welche Erfassungs- und Bewertungsinstrumente erforderlich wären. Monitoringprogramme wie die Nationale Bodenbeobachtung NABO und die Beobachtungs- und Überwachungsprogramme der Kantone (KABOs) liefern dafür ein solides Wissensfundament: Sie erfassen den Bodenzustand und seine zeitliche Entwicklung anhand gemessener Daten. Die Monitoringprogramme schauen nach vorn und zurück. Im Sinne der Vorsorge und Früherkennung werden mögliche künftige Veränderungen u.a. mit Modellen abgeschätzt und im Sinne einer Erfolgskontrolle lassen sich bereits umgesetzte Schutzmassnahmen nachträglich beurteilen.

Die NABO hat sich im Lauf der Zeit etabliert und weiterentwickelt. Ab Mitte der 1980er-Jahre liess der Bund den Boden in der Schweiz dauerhaft beobachten. Stand zu Beginn die Gefährdung durch chemische Schadstoffe und die Analyse von Bodenkennwerten wie pH-Wert und Bodenkohlenstoff im Fokus des Monitorings, wurden 2003 bodenphysikalischer Bodenparameter und 2012 auch mikrobiologische und molekulargenetische Parameter ins Messprogramm aufgenommen. Zudem haben Analysen über die Nährstoffe an Bedeutung gewonnen, um dem erweiterten Wissensbedarf der Landwirtschaft und für den Klimaschutz gerecht zu werden. Die Dauerbeobachtung des Bodens erhält dadurch eine unersetzbare Bedeutung. Nur dank den vielfältigen Analysen, die sich bei der Beprobung der NABO-Standorte jeweils miteinander kombinieren lassen, kann der Zustand der Böden ganzheitlich erfasst und beurteilt werden (siehe Abbildung 1).

Abbildung 1 (folgende Seite): Die vielfältigen und im Lauf der Jahre erweiterten Aufgaben der Nationalen Bodenbeobachtung NABO in einer Übersichtgrafik.

Nationale Bodenbeobachtung



1985 heute
Wiederholte Beprobung am selben Standort

Böden erfüllen viele wichtige Funktionen für die Ökosysteme und die Menschen. Sie bieten Lebensraum für Pflanzen und Tiere. Gesunde Böden sind auch die Grundlage für die Agrar- und Forstwirtschaft. Und sie versorgen uns mit sauberem Trinkwasser. Damit die Funktionalität der Böden langfristig erhalten bleibt, muss die Bodenqualität sorgfältig beobachtet werden. Die Nationale Bodenbeobachtung NABO erfasst und dokumentiert für ihre Monitoring-Standorte, wie sich die Bodenqualität langfristig entwickelt. Anhand der untersuchten Bodeneigenschaften und erhobenen Bewirtschaftungsdaten beurteilt sie verschiedene Bodengefährdungen.

Physikalische Bodeneigenschaften

- Lagerungsdichte
- Eindringwiderstand
- Bodenstruktur

Bewirtschaftungsdaten

- Fruchtfolge
- Dünger, Pflanzenschutzmittel
- Bodenbearbeitung



Dafür brauchen wir gesunde Böden:

- Produktion
- Lebensraum
- Regulierung

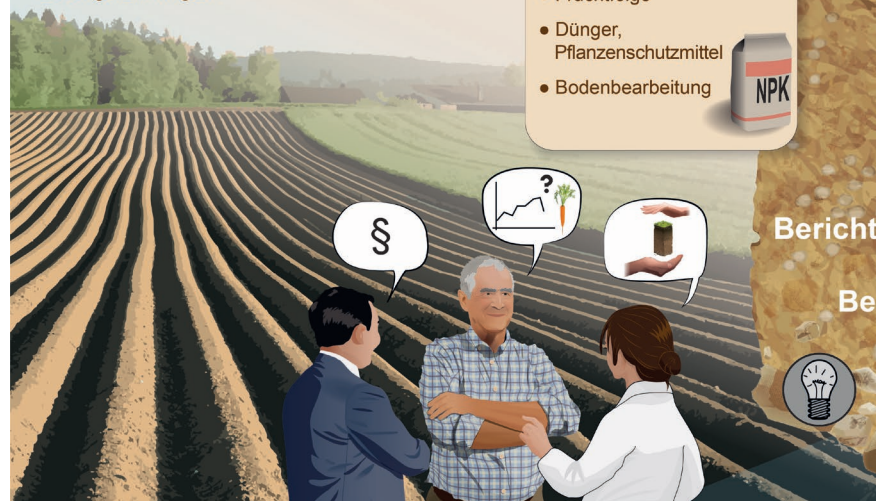
Chemische Bodeneigenschaften

- pH, C:N, Corg
- Nährstoffe
- Schadstoffe

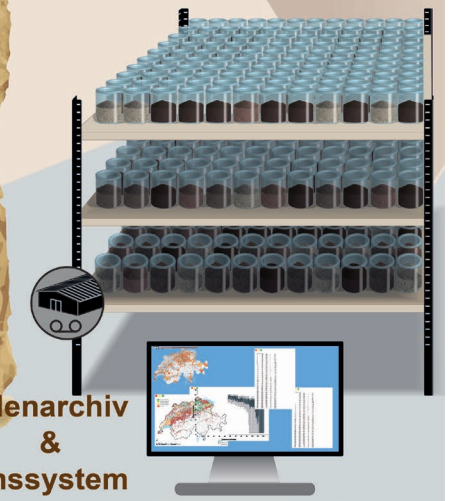
Biologische Bodeneigenschaften

- Mikroorganismen: Biomasse & Basalatmung
- Artenreichtum & Zusammensetzung

- Messnetz
- Probenahme
- Probenaufbereitung
- Bodenchemie
- Bodenbiologie
- Bodenphysik
- Bewirtschaftungsdaten



Berichterstattung & Beratung



Bodenarchiv & Bodeninformationssystem

Das Beobachtungsnetz wird kontinuierlich an neue Fragestellungen angepasst. Die Nationale Bodenbeobachtung nahm 2020 die achte Erhebung in Angriff. Die Erhebungen werden auf jedem Standort in fünfjährigen Intervallen durchgeführt. Im Erhebungszyklus 2015 bis 2019 kam es zu einer Anpassung des Erhebungsprogramms, insbesondere bei der Beprobungsstrategie und beim Standortkollektiv (Schwab & Gubler 2015). Die Anpassung der Beprobungsstrategie bezweckt, den Ressourcenaufwand für das Monitoringprogramm zu optimieren. So konzentrieren sich die Untersuchungen über das gesamte Bodenprofil auf die Hauptstandorte. Um stoffliche Verlagerungen in die Tiefe abzuschätzen, werden Horizontproben bis in eine Tiefe von 75 cm entnommen. Demgegenüber wird an Nebenstandorten nur der Oberboden (0 – 20 cm Tiefe) beprobt. Hauptkriterium bei der Einteilung in Haupt- und Nebenstandorte war die technische Machbarkeit. Eignen sich Böden für eine Beprobung des gesamten Bodenprofils, werden sie als Hauptstandorte definiert. Bei Nebenstandorten verhindern dagegen eine geringe Bodenmächtigkeit oder andere Gründe (z.B. Steine) die Beprobung in grössere Tiefen. Die Verteilung der Haupt- und Nebenstandorte ist in Abbildung 2 dargestellt. Zusätzlich zur Anpassung der Beprobungsstrategie wurden Lücken bei den beprobten Standorten bezüglich der Geologie, der räumlichen Verteilung über die Schweiz und der Höhenverteilung geschlossen. Das NABO-Messnetz erhielt dadurch sieben neue Standorte auf Graslandflächen in den Voralpen und Alpen (siehe «neue Standorte» in Abbildung 2 und Anhang 16.1). Vier dieser Standorte bestehen jeweils aus einem Hauptstandort und aus ein bis zwei zusätzlichen Standorten, die zwar geografisch nah, aber auf unterschiedlichen Höhenstufen liegen. Diese Standorte bezeichnen wir in Abbildung 2 als «Hauptstandort mit Höhenstufen».

Die NABO führt regelmässige Untersuchungen zu aktuellen Fragestellungen durch, die das dauerhafte Boden-Monitoring ergänzen. Dazu werden Standorte inner- und ausserhalb des NABO-Messnetzes bedarfsgerecht beprobt. Ein Beispiel ist die Entnahme von Bodenproben im Messnetz des Zustand-Indikators Z9 des Biodiversitätsmonitoring Schweiz BDM (siehe Kapitel 11). 2015 beteiligte sich die Schweiz zudem mit einer eigenen Probekampagne am europäischen Projekt LUCAS-Soil (siehe Kapitel 12). Zudem entwickelt die NABO für den Nationalen Aktionsplan Pflanzenschutzmittel (AP PSM) ein Monitoring von PSM-Rückständen im Boden (siehe Kapitel 10.1).

NABO-Dauerbeobachtungsstandorte

bisherige Standorte

- ▲ Hauptstandort
- Nebenstandort

neue Standorte (ab 7. Erhebung)

- ▲ Hauptstandort
- ▲ Hauptstandort mit Höhenstufen

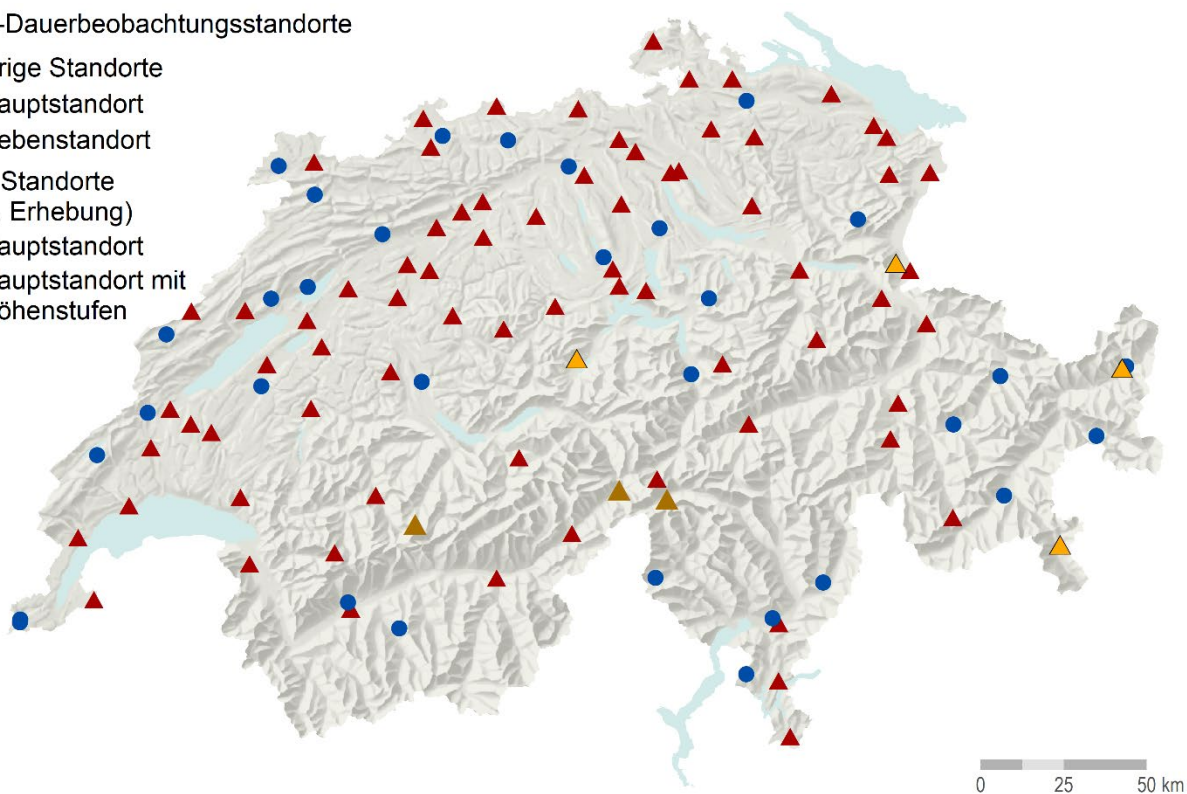


Abbildung 2: Das NABO-Messnetz verteilt über die Schweiz, Stand 2021: Die Beprobungsstrategie unterscheidet Haupt- und Nebenstandorte.

Ein Ausblick auf die Erweiterung und die Ergänzung der nationalen Bodenbeobachtung. Dass die Bodenbeobachtung thematisch zu erweitern ist, zeigt die jüngste Bedürfnisanalyse bei Bund und Kantonen (Gubler et al. 2020) auf. Die NABO-Projektleitung, in der das Bundesamt für Umwelt (BAFU) und das Bundesamt für Landwirtschaft (BLW) vertreten sind, erarbeitete deshalb ein Konzept für die Weiterentwicklung der Bodenbeobachtung. Dementsprechend soll die NABO künftig folgende sieben Aufgabenbereiche abdecken:

1. Bodenstruktur und deren Beeinträchtigung (inkl. Verdichtung)
2. Erosion
3. Humus
4. Schad- und Fremdstoffe
5. Stickstoff/Versauerung
6. Bodenbiologie und -biodiversität
7. Bodenquantität und -qualität (inkl. Bodenfunktionen)

Hierzu schaffen die drei Bundesämter BAFU, BLW und Bundesamt für Raumentwicklung (ARE) eine Koordinationsstelle, welche die einzelnen Arbeiten für diese Aufgabenbereiche untereinander koordiniert. Diese Stelle übernimmt auch die Verantwortung für die Auswertung der Daten und die Publikation von sämtlichen Informationen, die aus der erweiterten Bodenbeobachtung stammen.

Weiterführende Informationen

[Bedürfnisse der Kantone und des Bundes rund um ein Monitoring der Ressource Boden](#)

Bericht, Gubler et al. 2020.

[NABO-Standortkonzept: Betrieb des Messnetzes ab 2015](#)

Bericht, Schwab & Gubler 2015.

Übersicht über die Standorte der Nationalen Bodenbeobachtung

[Kurzportrait der Ackerbaustandorte](#)

[Kurzportrait der Graslandstandorte](#)

[Kurzportrait der Waldstandorte](#)

[Kurzportrait der Standorte mit Spezialkulturen](#)

[Kurzportrait der Schutzstandorte und der Stadtpärke](#)

Wächter et al. 2021.

www.nabo.ch > [Monitoring](#)

2 Ein interdisziplinäres Fallbeispiel: Wie spielen unterschiedliche Bodenanalysen zusammen?

Böden lassen sich in der Regel nur themenbezogen und abhängig vom Standort beurteilen. Um den Zustand des Bodens differenziert zu erheben, ist deshalb ein breites Spektrum von biologischen, physikalischen und chemischen Eigenschaften zu analysieren. Die NABO kümmert sich darum, unterschiedliche Standorte und Bodentypen einheitlich zu erfassen und gesamtheitlich zu betrachten. Anhand eines Ackerbodens wird beispielhaft gezeigt, welche Erkenntnisse die Verwaltung und die Praxis daraus ziehen können.

Der Vorteil der Nationalen Bodenbeobachtung ist, dass ein einzelner Messstandort hinsichtlich verschiedener Fragestellungen vertieft untersucht und mit einem standardisierten Messprogramm beprobt werden kann. So wurden an dem NABO-Standort, der für die hier dargestellte Fallstudie berücksichtigt wurde, folgende Analysen durchgeführt:

- > **Chemische Bodeneigenschaften** Beprobung alle 5 Jahre seit 1986 (Kapitel 8, 9 und 10)
- > **Bodenbiologie:** jährliche Beprobung seit 2012 (Kapitel 3 und 4)
- > **Bodenphysik:** Bestimmung von Begleitparametern wie Eindringwiderstand und weitere physikalische Kenngrößen (Kapitel 5)
- > **Bilanzierung von Stoffflüssen (indirektes Monitoring):** regelmässige Erfassung von Bewirtschaftungsdaten, unter anderem zur Berechnung von Oberflächen- und Stoffflussbilanzen (Kapitel 6)

Beim ausgewählten Standort handelt es sich um eine Ackerfläche in der Nordostschweiz, die in den letzten Jahren in einer Fruchtfolge bewirtschaftet wurde. Die Nutzung als Kunstwiese wechselte sich mit Ackerbau ab. Von 2014 bis 2016 wurde der Boden ackerbaulich genutzt. Dazu war die Kunstwiese im Herbst 2013 gepflügt worden, um im Frühling Zuckerrüben anzusäen. Im Jahr darauf folgte der Anbau von Mais und für die nächste Erntezeit Getreide. Seither wird die Fläche (wie bereits zuvor) als mehrjährige Kunstwiese bewirtschaftet. Zur weiteren Standortcharakteristik gehört: Der Bodentyp ist eine Kalkbraunerde mit wenig Gestein und viel Ton. Der Oberboden ist deshalb als skelettarm und sehr tonreich eingestuft. Die Parzelle selbst ist leicht geneigt.

Welche Informationen die NABO aus dem obengenannten Spektrum an Erhebungsdaten herausziehen kann, wird im Folgenden beispielhaft aufgezeigt. Die Ergebnisse zu den Stoffflüssen sind in Abbildung 3 dargestellt; Abbildung 4 gibt die gemessenen biologischen, chemischen und physikalischen Eigenschaften wieder. Die Erläuterungen sind jeweils mit Schlussfolgerungen ergänzt, wie sich die ausgewerteten Messgrößen untereinander beeinflussen können.

Oberflächenbilanzen geben wieder, welche Stoffe in den Boden gelangen. Die Nährstoff- und die Schwermetallflüsse am untersuchten Standort werden von der Fruchtfolge beeinflusst. Das Düngen ist dabei die wesentliche Eintragsquelle: Der Einsatz von Hofdünger auf der Kunstwiese verursacht vor allem Kupfer- und Zink-Einträge. Mineralische Phosphor-Dünger, die auf Ackerkulturen eingebracht werden, sorgen derweil für deutlich höhere Cadmium-Einträge.

Die physikalische Struktur des untersuchten Bodens wurde vor allem durch die Bearbeitung vor, während und nach dem Zuckerrübenanbau massiv verändert. Das Raumgewicht sinkt als Folge einer starken Auflockerung des Oberbodens deutlich. Dadurch werden zwar auch andere Messgrößen beeinflusst, beispielsweise die Schadstoffkonzentrationen. Allerdings ergeben sich daraus keine weiteren, aussagekräftigen Hinweise auf den Bodenzustand. Physikalische Begleitparameter werden oft genau deshalb erfasst: Sie decken methodische Ausreisser in einer Datenreihe auf. Weil sie den physikalischen Zustand des Bodens bei einer Probenahme beschreiben, liefern sie wertvolle Zusatzinformationen für die Interpretation der vielfältigen Messdaten.

Ein Vergleich der Bodenbiologie zwischen Kunstwiese und Ackerkultur ergibt deutliche Unterschiede. Der Umbruch der Parzelle nach der mehrjährigen Wiesennutzung spiegelt sich in den mikrobiellen Summenparametern wieder. Dieser Eingriff reduzierte sowohl die Masse als auch die Aktivität der Mikroorganismen. Parallel dazu sank der Gehalt des organischen Kohlenstoffs. In der Folge nahmen die mikrobiellen Summenparameter (mikrobielle Biomasse und Basalatmung) und die organische Substanz auch mit der Ackerbewirtschaftung zwischen 2013 und 2016 in der Tendenz leicht ab. Erst nach Wiederansaat der Kunstwiese regenerierte sich die Basalatmung – als Mass für die Aktivität der Mikroorganismen – und kehrte sehr schnell wieder auf das ursprüngliche Niveau zurück. Im Vergleich dazu verzögerte sich die Zunahme der Biomasse und der organischen Substanz. Deren Mengen erholten sich nur langsam und erreichten das Anfangsniveau erst nach vier Jahren.

Im Ackerbau werden Pflanzenschutzmittel eingesetzt. Die Wirkstoffe blieben in dem für diese Fallstudie ausgewählten Boden über Jahre nachweisbar. Zum Beispiel das Herbizid Terbutylazin: Vor der Anwendung liess sich der Wirkstoff nicht nachweisen; direkt nach der Anwendung wurde der höchste Wert im Boden gemessen; in den Folgejahren sanken die Konzentrationen in den Bodenproben. Allerdings wurden daneben inzwischen nicht mehr eingesetzte Stoffe nachgewiesen, wie das Herbizid Atrazin. Obwohl Atrazin seit 2011 nicht mehr zugelassen ist und auf dem beprobten Standort letztmals 1999 eingesetzt wurde, enthielt der Oberboden davon rund 6 µg/kg. In einzelnen Jahren wurden zwar tiefere Werte gemessen. Doch dabei handelt es sich um methodische Ausreisser, die durch Änderungen in der physischen Bodenbearbeitung entstehen können.

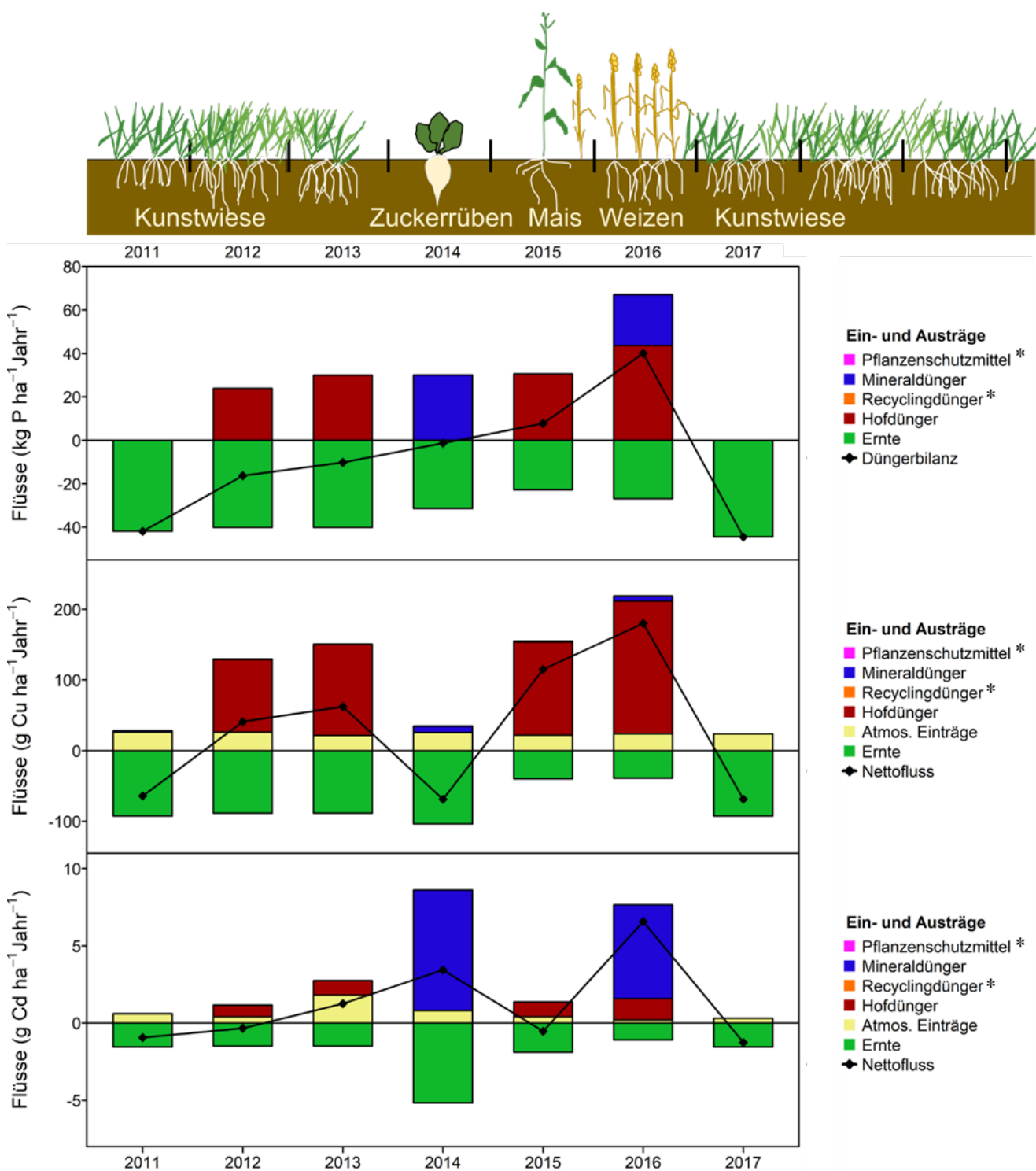
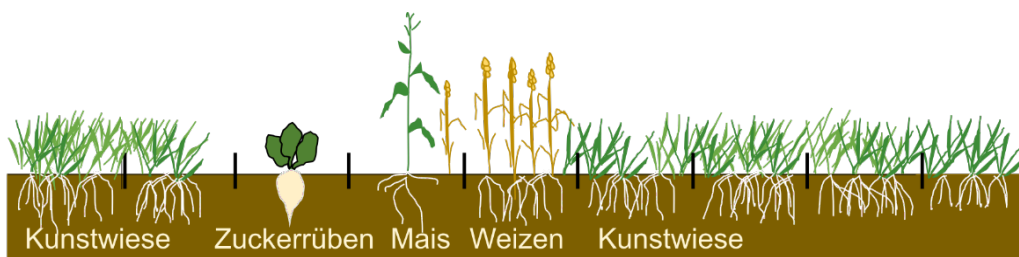
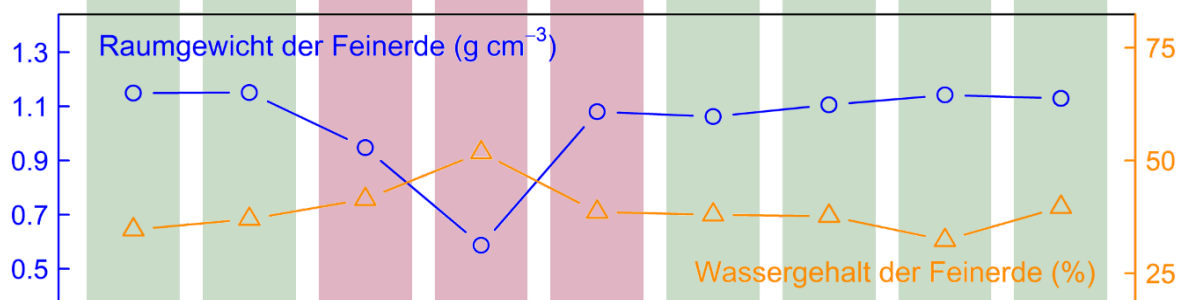


Abbildung 3: Die Oberflächenbilanzen für Phosphor (P), Kupfer (Cu) und Cadmium (Cd) am Fallstudienstandort, einer Ackerfläche in der Nordostschweiz. Angaben zur Erhebung von Oberflächenbilanzen finden sich im Kapitel 6.

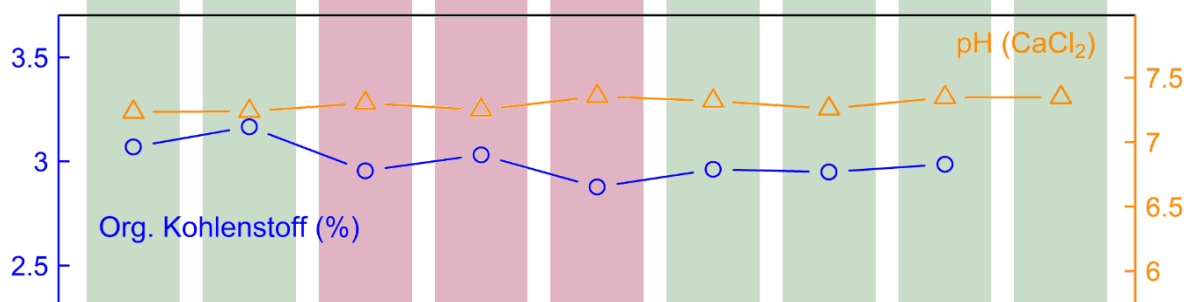
* = die Mengen dieser Einträge waren an diesem Standort sehr klein bzw. null und sind daher in der Abbildung nicht sichtbar.



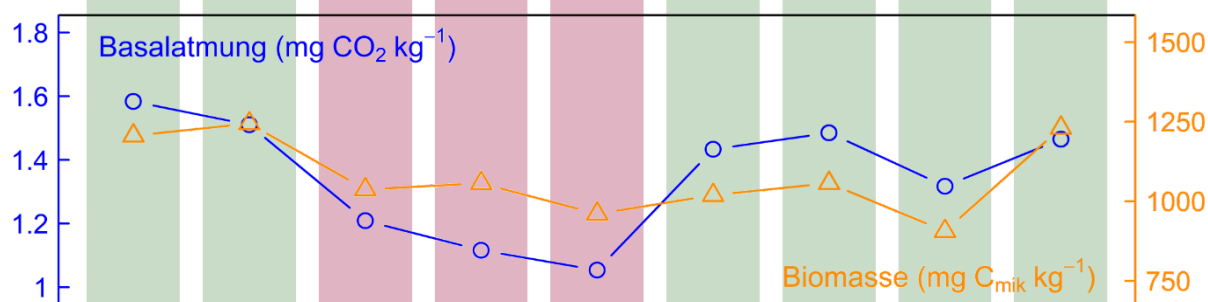
Physikalische Begleitparameter



Bodenkennwerte



Mikrobiologische Summenparameter



Pflanzenschutzmittel

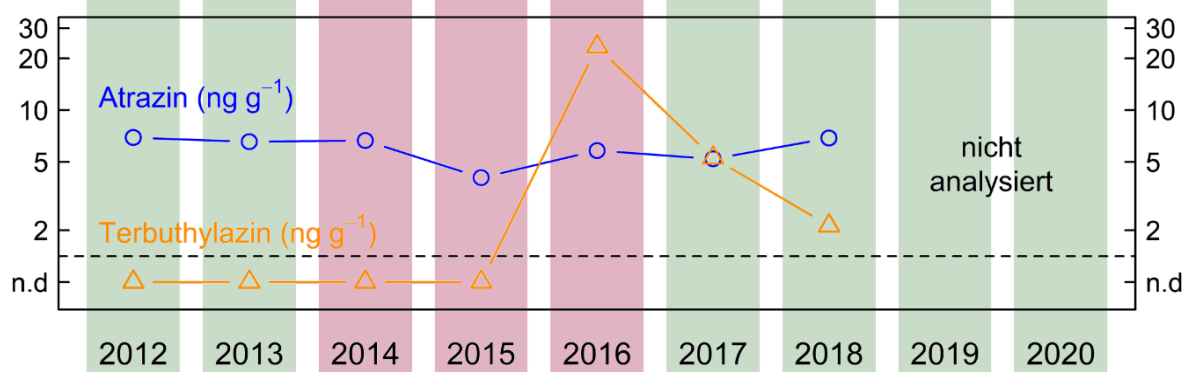


Abbildung 4: Die Messwerte am Fallstudien-Standort geben die Fruchtfolgebewirtschaftung wieder (n.d. = Substanz nicht nachgewiesen / unter Nachweisgrenze). Grüne Balken = Kunstwiese, rosa Balken = Ackerbau.

3 Den Bodenlebewesen auf der Spur: das bodenbiologische Monitoring

Der Boden ist der Lebensraum für unzählige Kleinstlebewesen wie Bakterien und Pilze. Die NABO führt ein spezifisches Monitoring auf Acker- und Graslandböden durch, weil die Mikrobiologie den Bodenzustand gut charakterisiert. Bisherige Befunde deuten darauf hin, dass Nutzungsänderungen die Bodenlebewesen in ihrem Vorkommen und ihrer Aktivität empfindlich stören können. Künftig sollen vermehrt molekulargenetische Analysen eingesetzt werden, um den Einblick in die Zusammensetzung des Bodenlebens zu vertiefen.

Der Boden ist ein Ort voller Leben: In einem Kubikmeter Erde können über 5 Billionen Kleinstlebewesen vorkommen. Aber nicht nur die Gesamtzahl, auch der Artenreichtum ist hoch. Das biologische Bodenmonitoring NABObio, das sich auf die Erhebung von Mikroorganismen konzentriert, erfasst zum einen, wie viele Kleinstlebewesen den Boden bevölkern und zum anderen werden der Artenreichtum und die Zusammensetzung der mikrobiellen Lebensgemeinschaften untersucht. Der Fokus liegt bislang bei Bakterien und Pilzen. Deren Gesamtmenge an Biomasse wird mithilfe der sogenannten Fumigations-Extraktions-Methode gemessen. Darüber hinaus wird an den NABObio-Bodenproben im Labor die Basalatmung bestimmt, die ein Mass für die mikrobielle Aktivität darstellt (Hug et al. 2018). Dabei wird die Menge CO₂ gemessen, welche Mikroorganismen im Boden durch die Atmung ausstossen. Ein weiterer Indikator zur Erhebung der Biomasse im Boden ist die Desoxyribonukleinsäure (DNS), die Trägersubstanz der Erbinformation, die jedes Lebewesen enthält. Die DNS wird aus den Bodenproben extrahiert und danach molekulargenetisch analysiert. Solche DNS-Extrakte sollen künftig auch zur Auswertung von Bodenzustandsveränderungen genutzt werden. Bei der bodenbiologischen Analytik arbeitet die NABO mit weiteren Forschenden an der Agroscope zusammen, etwa mit der Forschungsgruppe «Pflanzen-Boden-Interaktionen» und der Forschungsgruppe «Molekulare Ökologie».

Das NABObio-Monitoring konzentriert sich auf neun Acker- und zehn Graslandstandorte, die seit 2012 jährlich beprobt werden. Bis 2016 wurden zehn Waldstandorte zusätzlich erfasst. Die übrigen Standorte im NABO-Messnetz werden bis 2023 einmalig bodenbiologisch untersucht. Diese Erhebungen sollen einen Einblick ermöglichen, wie sich die Bodenbiologie verändert und Vergleiche zwischen Standorten und Nutzungsvarianten erlauben. Um die zeitliche Entwicklung zu veranschaulichen, wird für jeden Standort jeweils die Normabweichung aufgezeigt. Die statistische Auswertung bedient sich dabei «zentrierter Daten» (siehe Anhang 16.2: Was sind «zentrierte Daten»?).

3.1 Biologische Summenparameter reagieren auf Veränderungen

Abbildung 5 illustriert die Datenreihen der 19 NABObio-Standorte von 2012 bis 2020. Generell ist erkennbar, dass Ackerstandorte tiefere Biomasse- und Basalatmungswerte aufweisen als Graslandstandorte. Die Wertebereiche der mikrobiologischen Messdaten sind mit den Ergebnissen anderer Studien weitgehend vergleichbar (Fließbach et al. 2007; VBB 2009; Oberholzer und Scheid 2007; Anderson und Domsch 2010).

Die zeitliche Entwicklung zeigt zudem ein nutzungsabhängiges Muster: Auf Ackerflächen bleibt die mikrobielle Biomasse insgesamt stabil. Auf dem Grasland nimmt die Menge hingegen leicht ab. Zwei Standorte fielen hier besonders auf, weil die Biomasse jeweils gegen Ende der Messperiode (ab 2017 bzw. ab 2019) deutlicher abnimmt. Der Grund liegt in einer Bewirtschaftungsänderung: An beiden Standorten wurde die langjährige Graslandnutzung aufgegeben und durch Acker- oder Spezialkulturen ersetzt. Der Bodenbruch führte beim Humusgehalt, bei der mikrobiellen Biomasse und bei der Basalatmung zu einer deutlichen Abnahme, wie in Abbildung 5 («Verlauf nach Bewirtschaftungsänderung») ersichtlich.

Für die einzelnen Landnutzungstypen der NABObio Standorte betrachtet blieb die Basalatmung im Mittel, sowohl bei den Ackerstandorten als auch bei den Graslandstandorten, ohne gerichteten Trend, jedoch mit Schwankungen zwischen den einzelnen Jahren.

3.2 Molekulargenetische Methoden weisen standorttypische Lebensgemeinschaften nach

Von 2012 bis 2016 wurde die Diversität der Bakterien und Pilze zusätzlich mittels eines DNS-Metabarcoding untersucht. Metabarcoding ermöglicht es, durch die Sequenzierung bestimmter Genabschnitte auf der DNS sehr viele Taxa gleichzeitig zu bestimmen und so die Artenvielfalt einer Probe zu berechnen. In der vorliegenden Untersuchung

wurde die gesamte DNS aus den Bodenproben extrahiert. Aus diesen Proben wurden spezifische Genabschnitte (Barcodes) isoliert und durch Polymerase-Kettenreaktion (polymerase chain reaction, PCR) vermehrt. Anschliessend wurden diese Genabschnitte mittels Hochleistungssequenzierung (high throughput sequencing) analysiert und in ähnliche taxonomische Einheiten gruppiert. Diese Gruppen stellen eine Annäherung an Arten dar und die Sequenzen wurden mit Hilfe von Datenbanken von bekannten Bakterien und Pilzen taxonomisch eingeordnet.

Mit Hilfe dieser Analysen können die Bakterien- und Pilzgesellschaften einzelner Standorte molekularbiologisch charakterisiert werden. Der Befund? Die Standorte lassen sich gut voneinander unterscheiden, weshalb die Lebensgemeinschaften als standorttypisch und über die Zeit als stabil zu betrachten sind (Gschwend et al. 2021). Die wiederholte Probenahme während der fünfjährigen Messperiode zeigte zudem, dass die Artenvielfalt an jedem Standort sehr konstant bleibt (Gschwend et al. 2021). Dies zeigt auch die vereinfachte zweidimensionale Darstellung der sogenannten Beta-Diversität (siehe Abbildung 6): Je näher die Punkte beieinanderliegen, desto ähnlicher sind sich die mikrobiellen Gesellschaften. Jeder Punkt stellt dabei den Messwert einer Bodenprobe dar.

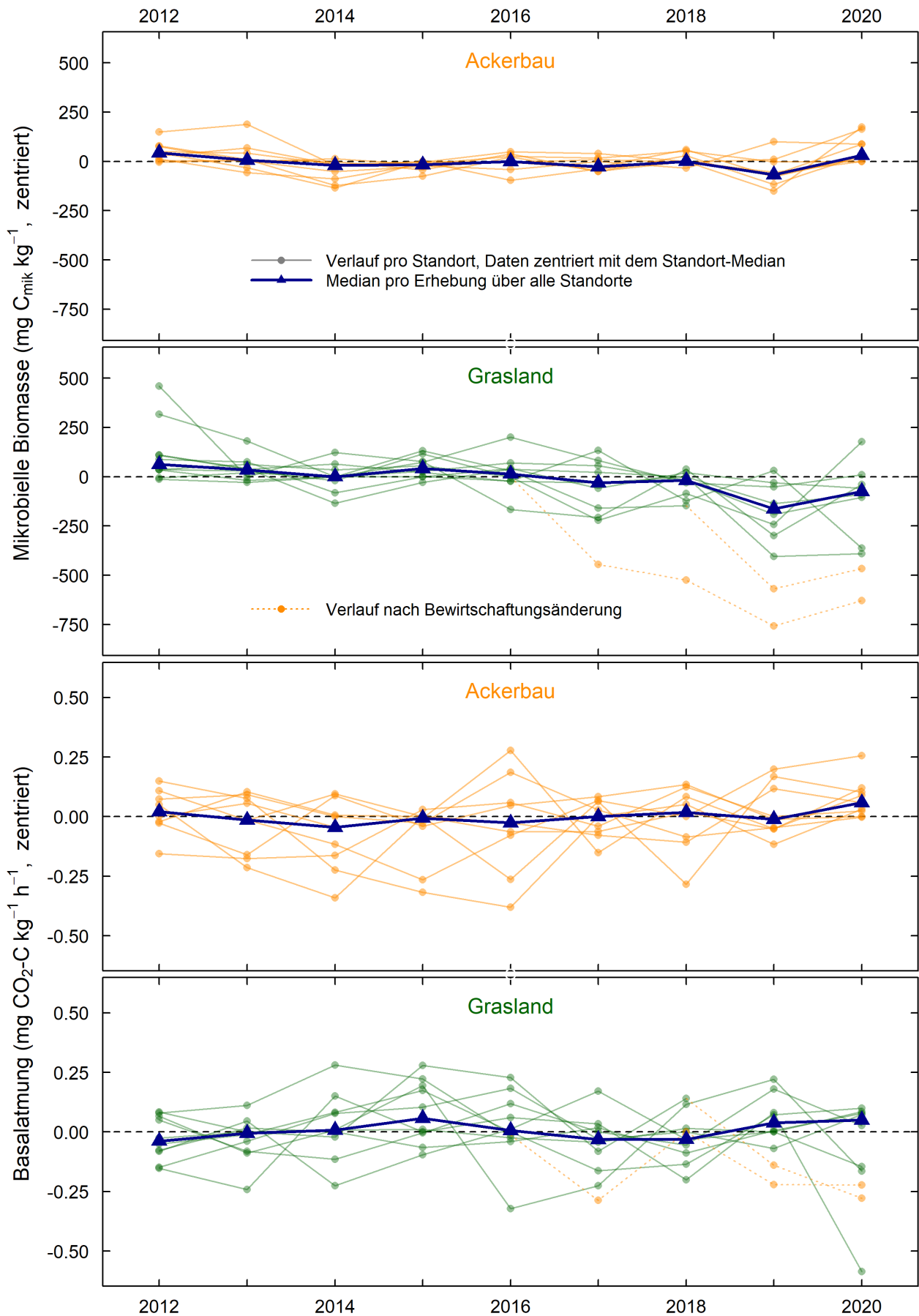


Abbildung 5: Zeitliche Entwicklung für die mikrobielle Biomasse (Fumigations-Extraktions-Methode; obere Hälfte) und die Basal-atmung (untere Hälfte) an NABObio-Standorten. Gezeigt werden die Verläufe von neun Ackerstandorten (1. und 3. Zeile) und zehn Graslandstandorten (2. und 4. Zeile) sowie der Median pro Nutzungsvariante. Zwei Graslandstandorte wurden nach einer Nutzungsänderung nicht mehr für den Median berücksichtigt. Der Verlauf der Messwerte wurde jeweils pro Standort zentriert, indem der Standort-Median subtrahiert wurde (siehe Anhang 16.2).

Die Landnutzung übt einen starken Einfluss auf die Lebensgemeinschaften des Bodens aus. Sowohl Bakterien-, als auch Pilzgemeinschaften weisen im Ackerbau eine höhere zeitliche Variabilität auf als im Grasland. Zudem zeigen Pilze im Ackerbau eine höhere zeitliche Variabilität als Bakterien (Gschwend et al. 2021).

Noch in Bearbeitung sind die Ergebnisse der jährlichen NABObio-Beprobungen nach 2016. In 2021 wurde die zehnte Beprobung durchgeführt. Dadurch sollen die Veränderungen bei der Diversität von 2016 bis 2021 aufgezeigt werden. Interessant wird auch eine Gegenüberstellung mit vorgängigen Probezyklen sein: Wie hat sich die Bodenbiologie im Lauf der letzten zehn Jahre verändert? Welche Standorte zeigen die grössten Veränderungen? Und welche Einflüsse oder Stressfaktoren haben diese Veränderungen verursacht?

Die Auswertung der ersten fünf Jahre hat gezeigt, dass sich die für NABObio entwickelte molekulargenetische Methodik erfolgreich in Monitoring-Programme integrieren lässt. Was für eine Erhebung der Diversität und der mikrobiologischen Summenparameter jedoch generell gilt: Um solide Basiswerte (Baseline) für jeden Standort zu erhalten, sind mehrfache Beprobungen über die Zeit durchzuführen. Dadurch können kurzfristige Schwankungen, welche z.B. durch verschiedenen Ackerfrüchte verursacht werden können, von längerfristigen Veränderungen (Trends) unterschieden werden. Nur so kann die Relevanz von Veränderungen und Verschiebungen der Lebensgemeinschaften erkannt und gegenüber kurzfristigen Schwankungen abgegrenzt werden.

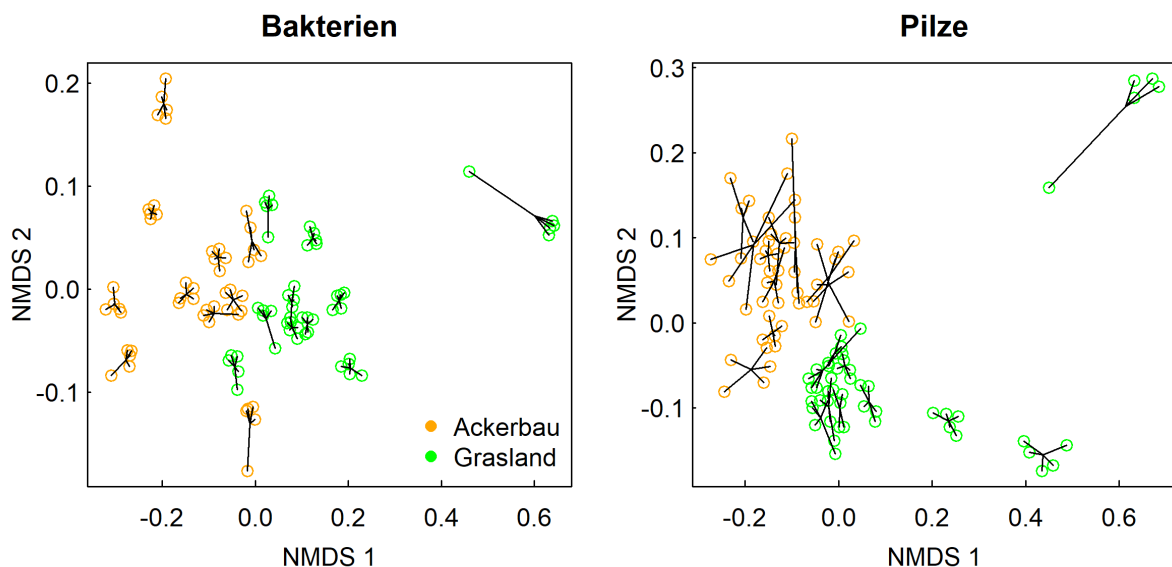


Abbildung 6: Ordinationen der Vergleiche von bakteriellen (links) und pilzlichen (rechts) Gemeinschaftsstrukturen. Jeder Punkt stellt eine ‚mittlere‘ Gemeinschaftsstruktur eines NABObio-Standorts pro Messjahr dar, die Farbe gibt den jeweiligen Nutzungstyp (orange = Acker, grün = Grasland) an und die einzelnen Standorte sind mit Linien zu ihrem Centroid (dem Mittelwert über die Zeitreihe) verbunden. Je näher sich zwei Punkte sind, desto ähnlicher sind die Gemeinschaftsstrukturen der Standorte.

Weiterführende Informationen

[NABObio – Bodenbiologie in der Nationalen Bodenbeobachtung, Ergebnisse 2012–2016, Handlungsempfehlungen und Indikatoren](#) Bericht, Hug et al. 2018.

[Long-term stability of soil bacterial and fungal community structures revealed in their abundant and rare fractions.](#)

Wissenschaftlicher Artikel, Molecular Ecology, Gschwend et al. 2021.

www.nabo.ch > [Monitoring](#) > [Biologische Untersuchungen](#)

4 Bodenbiologische Daten optimal nutzen: Gemeinsame Auswertung von drei kantonalen Messnetzen und der NABO

Neben der Nationalen Bodenbeobachtung sammeln auch Kantone eigene Daten zur Bodenbiologie. Um dieses Wissen gemeinsam zu nutzen, sind die Messmethoden und die Beurteilungsstandards untereinander abzustimmen. Vergleichende Auswertungen lassen einen Lösungsansatz erkennen, wie die Daten verschiedener Messnetze aggregiert werden können. Die NABO will die Grundlagen mit den Kantonen zusammen weiterentwickeln. Das Fernziel ist ein gemeinsamer und umfassender Qualitätsindikator für die Bodenbiologie.

Die Lebensgemeinschaften von Pilzen, Bakterien und anderen Mikroorganismen sind ein Garant für die Qualität und die Funktionen des Bodens. Ebenso tragen sie zur Erhaltung der Biodiversität, zur Ernährungssicherheit und zum Schutz vor dem Klimawandel bei. Informationen über den Zustand der Bodenbiologie sind deshalb relevant für viele Gesellschaftsbereiche. Auch der Bund und die Kantone sind darauf angewiesen, um die Entwicklung der Böden in der Schweiz beurteilen zu können. Wie eine Bedürfnisanalyse zeigt (Gubler et al. 2020), sind sich die beteiligten Akteure einig: Es braucht nicht nur Messdaten, sondern auch entsprechende Beurteilungsinstrumente, die zum Beispiel das Festlegen standortspezifischer Referenzwerte erlauben. Im Weiteren ist Grundlagenarbeit erforderlich, um verständliche, nachvollziehbare Qualitätsindikatoren aus den erhobenen Daten zu aggregieren.

So wie die NABO (siehe Kapitel 3) ein gezieltes bodenbiologisches Monitoring durchführt, sammeln auch einige Kantone spezifische Informationen zur Bodenbiologie. Aargau, Bern und Graubünden betreiben eigene Messnetze und erheben an den Standorten dieselben mikrobiologischen Parameter wie die NABO. Die Analyse der Bodenproben führt das Labor der Agroscope jeweils im Auftrag der Kantone durch und verwendet dazu standardisierte Referenzmethoden der früheren Eidgenössischen Landwirtschaftlichen Forschungsanstalten (FAL, FAW, RAC 1998). Die Probenahme in den drei Kantonen ist, trotz gewisser Unterschiede, der NABO-Methode sehr ähnlich. Deshalb konnten die bodenbiologischen Daten der kantonalen Messprogramme und der NABO gemeinsam ausgewertet werden. Die Ergebnisse dieser Zusammenarbeit sind im Bericht von Hug et al. (2021) publiziert.

4.1 Vergleich der Messwerte, unter Berücksichtigung der Standorteigenschaften

Die biologischen Summenparameter – die mikrobielle Biomasse und die Basalatmung – zeigen jeweils standortspezifische Werte an. Zu den wesentlichen Einflussfaktoren gehören die Bodeneigenschaften, die klimatischen Faktoren und die landwirtschaftliche Nutzung. Die Messwerte verschiedener Standorte lassen sich deshalb untereinander nicht vergleichen. Für eine gemeinsame Auswertung der Daten der NABO und der Kantone war deshalb ein Vorgehen zu bestimmen, wie die vier Messprogramme zu aggregieren sind. Eine Beurteilung der Messdaten anhand standortspezifischer Referenzwerte ist dazu vorteilhaft. Solche Referenzen wurden für die biologische Qualität von Ackerböden (Biomasse und Basalatmung) auf empirischer Basis erarbeitet. Dies erlaubt nun, die Messdaten eines beprobten Standorts in fünf Qualitätsklassen von «sehr tief» bis «sehr hoch» einzuteilen (Oberholzer et al. 1999; Oberholzer und Scheid 2007; VBB/BSA 2009).

Um den Zustand für das gesamte Standortkollektiv wiederzugeben, werden die klassierten Werte grafisch dargestellt. So werden die Anteile der jeweiligen Klassen unmittelbar ersichtlich. Die Voraussetzung für einen gemeinsamen Qualitätsindikator ist jedoch, dass die Standortkollektive identisch beprobt worden sind. Um die Daten der unterschiedlichen, nationalen und kantonalen Messprogramme aggregieren zu dürfen, galt es deshalb die zeitliche Auflösung auf ein Jahr anzugleichen. Daten von Standorten mit einem anderen Probenahmezyklus werden jeweils so lange zur Beurteilung beigezogen, bis die Ergebnisse einer nächsten Proberunde vorliegen.

Die Entwicklung der mikrobiologischen Summenparameter über die Zeit ist mit Vorsicht zu geniessen; solange nicht immer dasselbe Standortkollektiv betrachtet wird. Am Beispiel der Biomasse, welche in der Abbildung 7 als Säulendiagramm darstellt wird, nimmt die Anzahl der Standorte bis 2012 stetig zu. Erst ab diesem Zeitpunkt bleibt das Standortkollektiv konstant und es können Aussagen über die zeitliche Entwicklung gemacht werden. Die Menge der Biomasse kann anhand der Qualitätsklassen mehrheitlich als normal beurteilt. Die Anteile der verschiedenen Klassen präsentieren sich als sehr stabil. Leichte Schwankungen über die Jahre, wie in Abbildung 7 ab 2012 ersichtlich, gelten immer noch als stabiler Verlauf, da diese z.B. durch Witterungseinflüsse erklärt werden können.

Auch bei den Ergebnissen der Basalatmungsanalysen müssen kurzzeitige Schwankungen zwischen den Jahren von längerfristigen Trends unterschieden werden. Eine Interpretation der zeitlichen Entwicklung (Abbildung 8) lässt folgendes Urteil zu: Bis auf wenige Ausnahmen liegen die Werte im normalen, hohen und sehr hohen Bereich im Vergleich zu den Messdaten der Standorte, welche zur Definition der Qualitätsklassen verwendet wurden (Oberholzer et al. 1999, Oberholzer und Scheid 2007, VBB/BSA 2009). In jüngerer Zeit scheinen die Klassen mit überdurchschnittlicher Bewertung anteilmässig sogar zu wachsen. Mittels dem metabolischen Quotienten (Basalatmung dividiert durch mikrobielle Biomasse) kann überprüft werden, ob die Mikroorganismen einem Stress ausgesetzt sind. Generell sind langfristige Veränderungen, insbesondere eine Verringerung der mikrobiellen Biomasse und der Basalatmung bzw. eine Erhöhung des metabolischen Quotienten, jeweils vertieft abzuklären. So ist hierfür zu klären, ob sie durch natürliche Bedingungen oder durch Bewirtschaftungsänderungen verursacht werden.

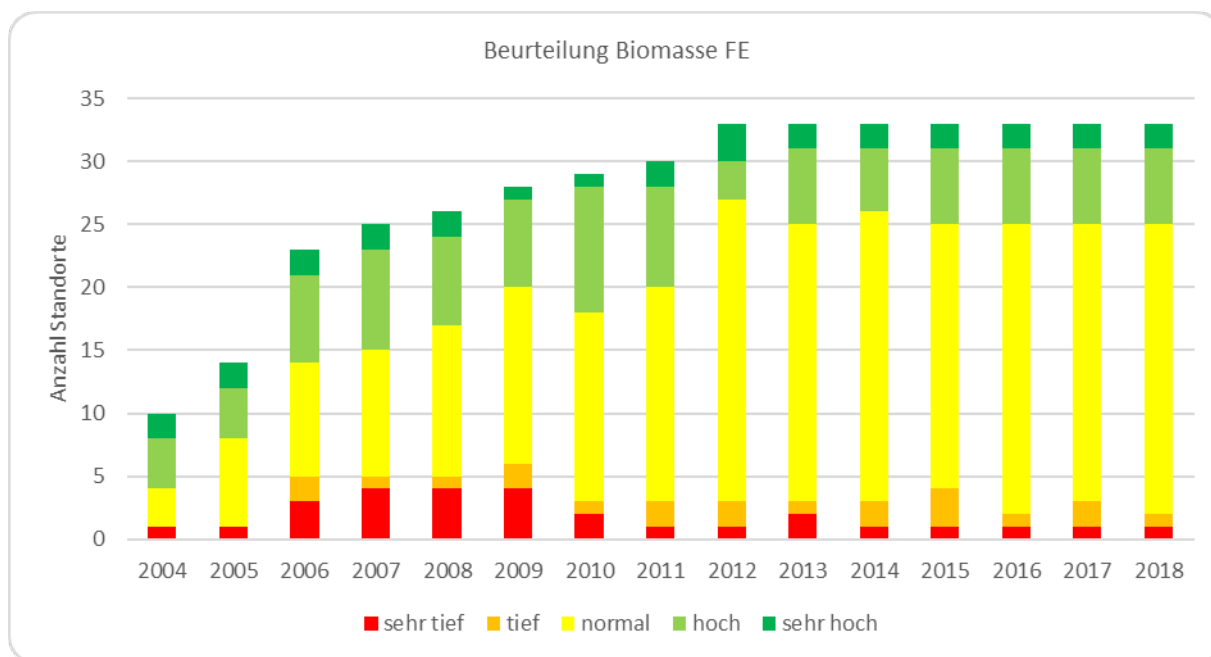


Abbildung 7: Angaben zur mikrobiellen Biomasse (Fumigations-Extraktions-Methode) gemäss einer Auflistung der pro Standort bewerteten Klasse; Darstellung der zeitlichen Veränderung für 33 Standorte aus NABObio und den Messprogrammen der Kantone Aargau, Bern und Graubünden.

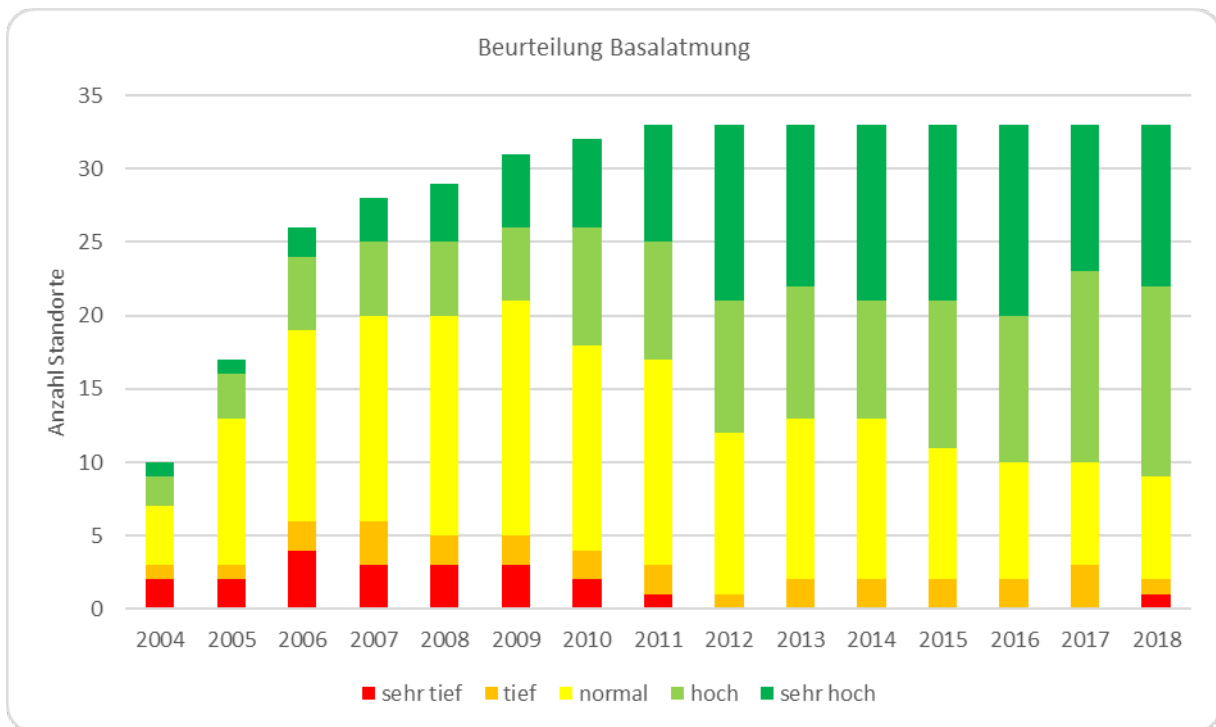


Abbildung 8: Angaben zur Basalatmung gemäss einer Auflistung der pro Standort bewerteten Klasse; Darstellung der zeitlichen Veränderung für 33 Standorte aus NABObio und den Messprogrammen der Kantone Aargau, Bern und Graubünden.

4.2 Über Beurteilungsklassen zum Zustandsindikator Q

Eine Bewertung kann unterschiedliche Zwecke erfüllen. Für die prägnante Kommunikation wirkt eine Einstufung der Qualitäten von «sehr tief» bis «sehr hoch» äusserst anschaulich. Weiterführende wissenschaftliche Auswertungen sind dagegen auf numerische und kontinuierliche Bewertungsgrössen angewiesen. Deshalb wurde der Zustandsindikator Q definiert. Dieser berechnet sich aus dem Verhältnis zwischen dem effektiven Messwert und dem standorttypischen Referenzwert gemäss der Arbeitsgruppe «Vollzug Bodenbiologie» (VBB/BSA 2009). Der biologische Zustandsindikator Q bezieht sich auf jeden einzelnen Standort und jede einzelne Beprobung und zeigt Veränderungen im Vergleich zur oben erwähnten Klassifizierung deshalb sensibler an. Gleichzeitig lässt sich der Zustand spezifisch für die Biomasse (Indikator Q_{FE-C}) respektive die Basalatmung (Q_{BA}) aggregieren (Hug et al. 2021). Aussagen über ein Datenkollektiv liefert der Mittelwert oder Median des jeweiligen Zustandsindikators. Beispielhaft gibt Abbildung 9 die Q_{FE-C} -Datenreihe der neun NABObio-Ackerstandorte wieder.

Das Aggregieren von bodenbiologischen Messdaten zu einem oder mehreren Qualitätsindikatoren steht erst am Anfang. Die oben ausgeführten, methodischen Ansätze sind dazu schrittweise weiterzuentwickeln: Erstens soll sich die Datenbasis verbessern, indem mehr Standorte beprobt respektive Daten aus weiteren Messprogrammen berücksichtigt werden. Zweitens braucht es dringend weitere Beurteilungsgrundlagen: Das für Ackerstandorte anwendbare Modell für Biomasse- und Basalatmungs-Referenzwerte lässt sich nicht für Graslandböden verwenden, da Grasland andere Wertebereiche für die einzelnen Beurteilungskriterien aufweist und es noch keine Referenzgleichungen für die hier verwendeten Methoden gibt. Aber auch die Acker-Referenzwerte sind anhand neuerer Daten zu aktualisieren. Im dritten Schritt sollen die oben dargestellten, mikrobiologischen Summenparameter mit Diversitätsindikatoren oder weiteren Aspekten ergänzt werden. Und was auch noch zu leisten ist: Die Aussagen über die einzelnen bodenbiologischen Indikatoren sind zu einem Gesamtindikator für den Zustand der Bodenbiologie zusammenzufassen.

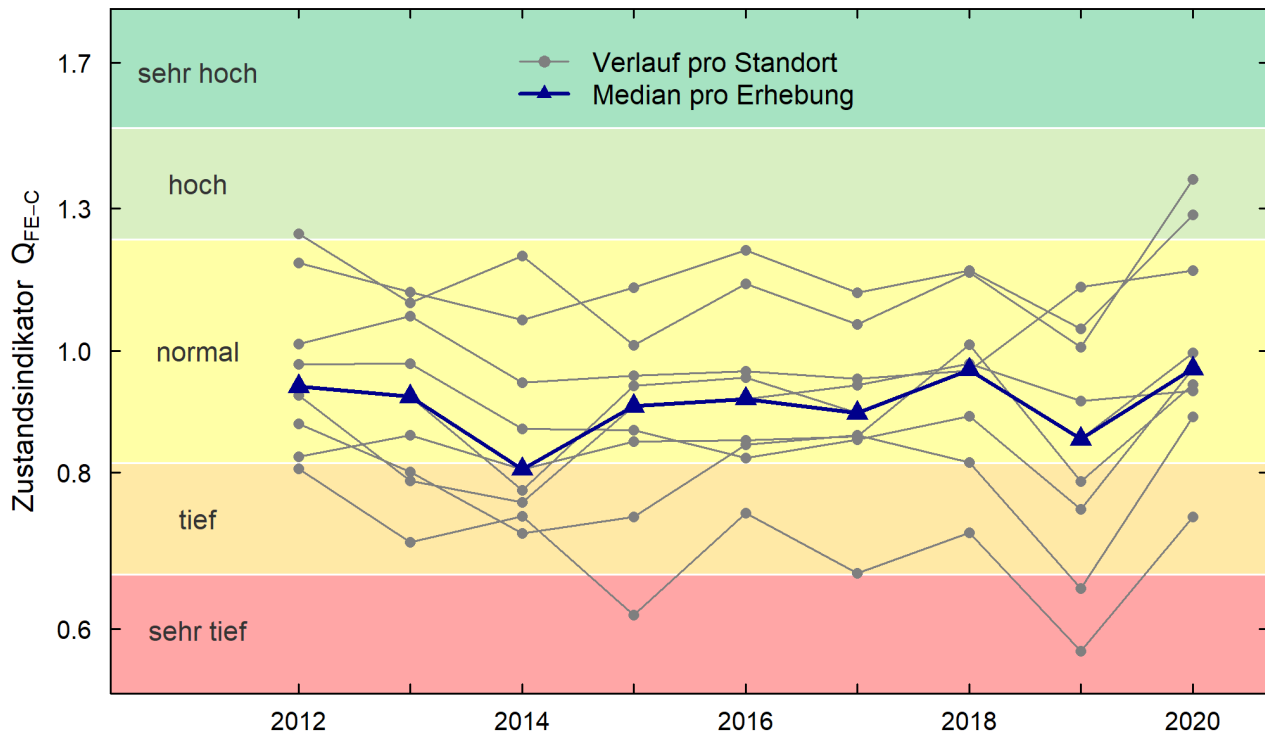


Abbildung 9: Der Zustandsindikator Q_{FE-C} von neun Ackerstandorten, beurteilt für 2012 bis 2020.

Weiterführende Informationen

[Monitoring Bodenbiologie. Auswertung bodenmikrobiologischer Daten von kantonalen und nationalen Bodenbeobachtungsstandorten](#) Bericht, Hug et al. 2021.

www.nabo.ch > [Monitoring](#) > [Biologische Untersuchungen](#)

5 Bodenphysik: Die Struktur des Bodens erzählt viel über seine Eigenschaften

Die Physik des Bodens wird unter anderem durch das Gewicht, die Dichte und den Wassergehalt einzelner Schichten bestimmt. Die Erhebung solcher Daten beurteilt beispielsweise die Verdichtung von Böden. Bodenphysikalische Informationen sind essentiell für die korrekte Interpretation der Analysen an den Standorten, denn sie erlauben eine genauere Beurteilung der Bodenchemie und -biologie und verbessern das Verständnis über die vielfältigen, sich gegenseitig beeinflussenden natürlichen Prozesse im Boden.

Auf engstem Raum beeinflussen sich biologische, chemische und physikalische Prozesse gegenseitig, die in der Bodenmatrix (Festphase), im Bodenwasser (Flüssigphase) und in der Bodenluft (Gasphase) stattfinden. Um die Eigenschaften und den Zustand des Bodens ganzheitlich zu verstehen, sind diese Milieus mit allen drei Fachdisziplinen (Bodenbiologie, -physik und -chemie) zu durchleuchten. Bodenphysikalisch relevant ist die Struktur, oder wie porös und durchlässig die Matrix ist. Daraus wird zum Beispiel ersichtlich, wie viel Wasser darin gespeichert werden kann bzw. versickert. Physikalische Eigenschaften beeinflussen sowohl die Bodenbiologie – indem sie die Aktivität und Zusammensetzung der Lebewesen prägen – als auch die Bodenchemie, was unter anderem die Nährstoffverfügbarkeit, das Abbau- und Filtervermögen von Schadstoffen oder das Redoxpotential betrifft.

Die Nationale Bodenbeobachtung begann ab 2001 mit dem Erfassen physikalischer Bodeneigenschaften. Das damalige Pilotprojekt befasste sich mit Tests für Erhebungsmethoden und Kenngrößen (LAZBO-Projekt; Schwab et al. 2006). Bereits ab 2003 wurde das NABO-Monitoring durch bodenphysikalische Messungen ergänzt. Standardmässig werden Raumgewicht, Lagerungsdichte und Wassergehalt der Feinerde als physikalische Begleitparameter im Oberboden, bis in eine Tiefe von 20 cm, erfasst (Schwab und Gubler 2016). Und seit 2013 wird ein eigentliches bodenphysikalisches Monitoring durchgeführt. Dabei wird die Bodenverdichtung mithilfe eines Penetrometers (PANDA-Sonde) erhoben, der den Eindringwiderstand messen kann. An besonders interessanten NABO-Standorten wurde das physikalische Untersuchungsprogramm nochmals erweitert: Hier werden einmalig zusätzlich das Desorptionsverhalten, die Luft-Permeabilität und die Gasdiffusion im Oberboden, in der Pflugschicht und im Unterboden bestimmt.

5.1 Physikalische Begleitparameter dokumentieren die Probenahme

Wie erwähnt sind bodenphysikalische Informationen wichtige Mosaiksteine für die Beurteilung der biologischen und chemischen Bodenqualität. So liefern das Raumgewicht, die Lagerungsdichte und der Wassergehalt wichtige Meta-Informationen: Sie dokumentieren den Bodenzustand bei der Beprobung und bilden eine Vergleichsbasis für die Standortbeurteilung bei wiederkehrender Beprobung. Zudem werden die Angaben über das Raumgewicht benötigt, um die gemessenen Stoffkonzentrationen in volumen- oder flächenbezogene Stoffvorräte umzurechnen. Darüber hinaus hat die NABO eine Methode entwickelt, die das Raumgewicht an einem Probestandort – alternativ zur direkten Messung – mithilfe von Pedotransfer-Funktionen (Schwab und Gubler 2019) aus den Angaben zu anderen Bodeneigenschaften abschätzen kann.

In der Regel konzentriert sich die Erhebung der physikalischen Begleitparameter auf den Oberboden. Dafür werden Zylinderproben bis in eine Tiefe von 20 cm entnommen (Schwab und Gubler 2016). Seit der Anpassung der Beprobungsstrategie per 2015 (siehe Kapitel 1) werden Hauptstandorte bis in eine Tiefe von 75 cm beprobt. Diese Bohrkernkerne liefern profulumfassendere Angaben über die Bodenphysik wie Struktur und Verdichtungsmerkmale. Da die Bohrkernkerne als Volumenprobe entnommen werden, lassen sich daraus auch Stoffvorräte abschätzen.

5.2 Messungen mit dem Penetrometer – je dichter der Boden, desto grösser der Widerstand

Natürliche Faktoren und menschliche Tätigkeiten beeinflussen die Bodenstruktur. Die natürliche Entstehungsgeschichte prägt zum Beispiel die Körnung und die Horizontschichtung des Bodens. Sie bestimmt also, wie dicht das Bodenmaterial gelagert ist, und wie gut die einzelnen Bodenhorizonte strukturiert sind. Der anthropogene Einfluss

beinhaltet primär die Bodenbewirtschaftung, unter anderem das Befahren und die Bearbeitung der Böden, beispielsweise beim Pflügen, diese erzeugen einen grossen physischen Druck auf den Bodenkörper, ebenso unsachgemässe Bestossung von Weiden. Zu grosse Kräfte beeinträchtigen die intakte Bodenstruktur.

Ein Monitoring der Bodenphysik hat die Aufgabe, die Wirkung der natürlichen und menschlichen Einflüsse zu bestimmen. Das NABOphys-Monitoring erfasst Änderungen in der Verdichtung seit 2013, wofür 38 NABO-Standorte ausgewählt wurden (Schwab 2010; Schwab et al. 2018). Die Beprobung findet mindestens alle fünf Jahre statt. Einige Standorte werden häufiger beprobt, um die Erhebungsmethode weiterzuentwickeln. Inzwischen konnte jeder Standort mindestens einmal und die am häufigsten beprobten Standorte bis sieben Mal beprobt werden. Diese Erhebungsdaten bilden eine Referenzbasis, um zukünftige Veränderungen erkennbar zu machen.

Luft, Wasser und Pflanzenwurzeln können verdichtete Böden schlecht durchdringen. Der Penetrometer macht sich diesen physischen Widerstand zunutze. Eine Sonde misst den Kraftaufwand beim Abteufen in den Boden. Der Eindringwiderstand ist für einen bestimmten Boden allerdings keineswegs konstant; die Unterschiede zwischen den Bodenschichten fallen teilweise sehr deutlich aus (siehe Abbildung 10). Für die meisten Böden ist der Eindringwiderstand in der obersten Bodenschicht am geringsten. Der in der oberen Grafikreihe dargestellte Standort zeigt zudem eindrücklich, dass sich der Eindringwiderstand über die Zeit verändert. Weil neben der Dichte auch der Wassergehalt zu berücksichtigen ist, weist ein hoher Widerstand auch auf trockene Böden hin. Deshalb sind Informationen zum Wassergehalt für eine Interpretation der Bodenverdichtung unerlässlich. Des Weiteren wird eine Beurteilung der Bodenstruktur zur Lokalisierung verdichteter Zonen beigezogen. Auf Ackerböden gilt zudem: Im Pflughorizont (in der Regel die obersten 20 bis 25 cm) ist der Eindringwiderstand ein wenig aussagekräftiges Mass, da die Bearbeitung hier die Bodendichte stark beeinflusst.

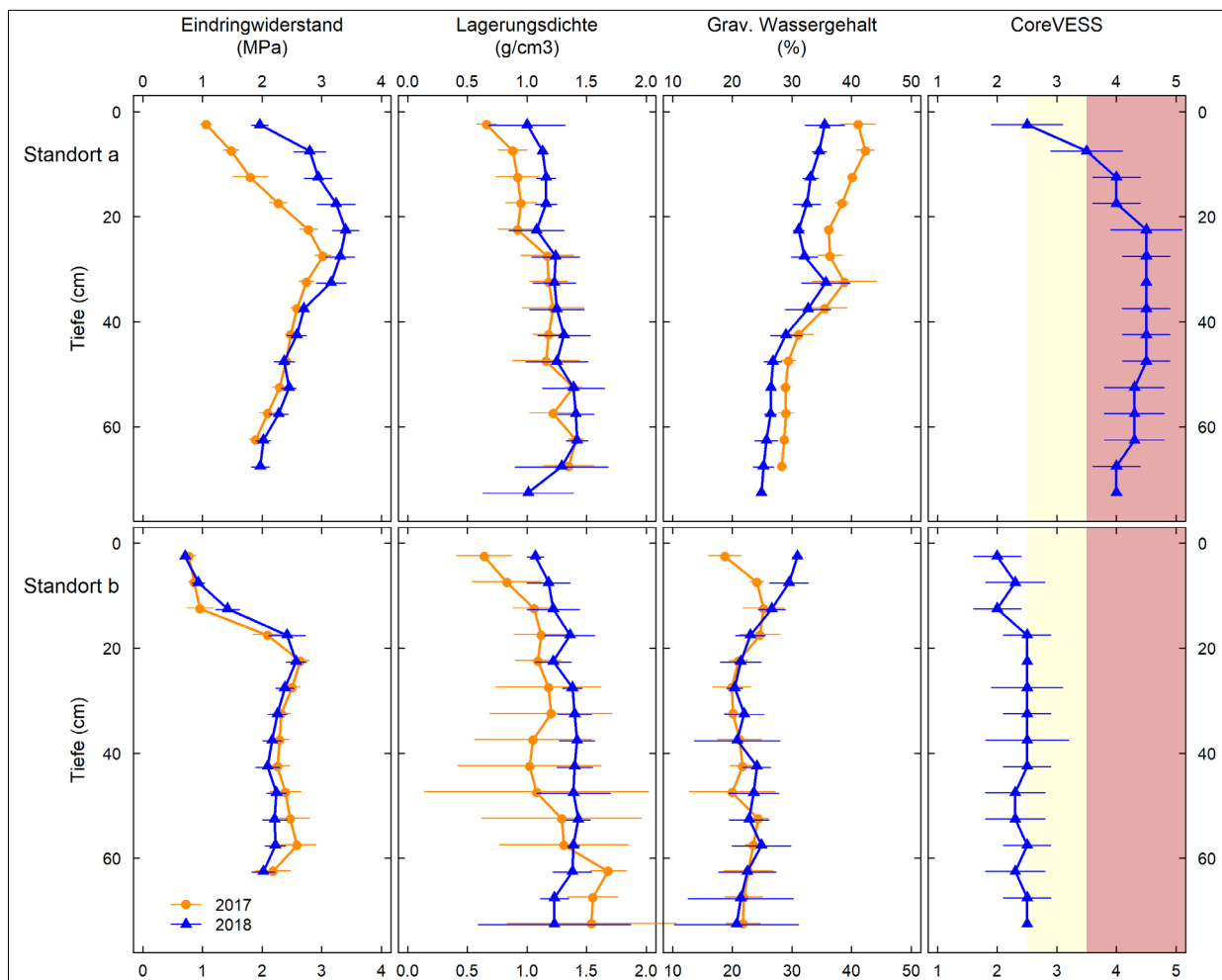


Abbildung 10: Eindringwiderstand (gemessen mit PANDA-Sonde) in Abhängigkeit der Bodentiefe für zwei unterschiedliche Ackerstandorte in zwei aufeinanderfolgenden Jahren (2017 und 2018). Lagerungsdichte, Wassergehalt und Strukturbeurteilung CoreVESS (nur 2018) wurden anhand von Bohrkernen bestimmt.

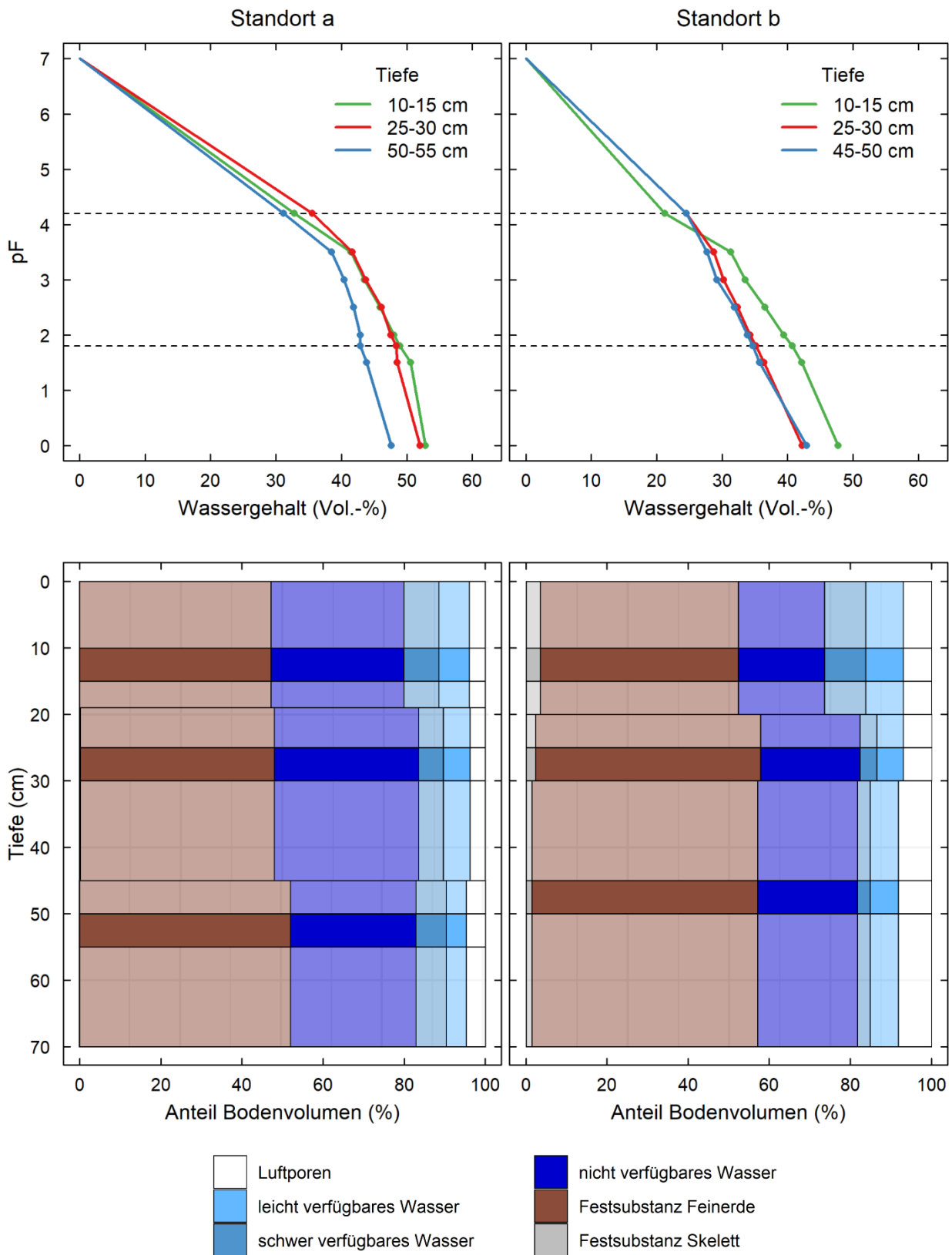


Abbildung 11: Desorptionskurven (oben) und die daraus abgeleitete Porenverteilung für zwei ausgewählte Böden (Messstandorte gemäss Abbildung 10).

An beiden Messstandorten zeigen die gemessenen Daten zum Eindringwiderstand eine dichtere Zone in etwa 20 bis 30 cm Tiefe, also direkt unterhalb des Pflughorizontes. Beim ersten Standort nimmt der Widerstand in noch tieferen Schichten deutlich ab, beim zweiten bleibt er auch im Unterboden relativ hoch. Die visuelle Beurteilung der Bodenstruktur mit der CoreVESS-Methode (Johannes et al. 2017) fällt für den zweiten Standort dennoch gut aus. Aus dem Vergleich der beiden Standorte lässt sich deshalb ableiten: Die Qualität des Bodengefüges kann trotz gleichem Eindringwiderstand sehr unterschiedlich sein. Insofern lassen sich die Messwerte in Abbildung 10 folgendermassen interpretieren: Der relative hohe Eindringwiderstand im Unterboden scheint eher natürlichen Ursprungs zu sein. Demgegenüber ist die Bewirtschaftung eindeutig für die verdichteten Zonen in der Pflugschleife verantwortlich.

5.3 Böden besser verstehen, dank physikalischer Begleitparameter

Die Kenntnis der physikalischen Eigenschaften ist zentral für das Verständnis von Verlagerungsprozessen und Stoffflüssen im Boden. Deshalb ist für das Studium der Nährstoffe, Schadstoffe und der organischen Substanz auch die Bodenphysik am Standort einer Probenahme zu untersuchen. Zudem sind rechnerische Prognosemodelle, welche die Prozesse im Boden simulieren, meistens mit verschiedenen bodenphysikalischen Informationen zu füttern. Deshalb lancierte die NABO vor drei Jahren eine einmalige Beprobung mehrerer physikalischer Eigenschaften an ausgewählten und für die Messungen geeigneten Standorten. Diese Erhebungen erfolgen in Zusammenarbeit mit der Agroscope-Forschungsgruppe «Bodenqualität und Bodennutzung» und erfassen das Desorptionsverhalten (pF-Kurve), die Luft-Permeabilität und die Gasdiffusion. Die Bodenproben werden aus zwei bis drei unterschiedlichen Tiefen entnommen und im Bodenphysiklabor der Agroscope untersucht.

Die Messresultate liefern Informationen zur Porosität und zu weiteren Funktionen des Bodens, wie die Wasserverfügbarkeit. Anhand der Desorptionskurve (pF-Kurve) lässt sich Letztere mithilfe der Grössenverteilung der Poren ableiten (siehe Abbildung 11). Je höher der pF-Wert ist, desto stärker ist das Wasser im Boden gebunden – und desto höher ist die Saugspannung. Letztere ist die Kraft, mit der das Wasser aus den Poren gezogen werden muss. Ein Saugspannungsbereich oberhalb pF 4.2 ist für kleine Bodenporen charakteristisch; das Wasser wird stark gebunden. Grössere Poren (unterhalb pF 1.8) können Wasser nicht halten und sind meistens mit Luft gefüllt. Pflanzenwurzeln beziehen sodann nur denjenigen Teil des Wassers, das sich im Saugspannungsbereich von pF 1.8 bis 4.2 an Bodenporen bindet. In einem weiteren Auswertungsschritt können die Erkenntnisse zur Porenverteilung auf das gesamte Bodenprofil hochgerechnet werden. Daraus ergibt sich, wie viel pflanzenverfügbares Wasser der Boden am Probestandort speichern kann.

Weiterführende Informationen

[Methoden zur Bestimmung physikalischer Begleitparameter an Bodenproben](#)

Bericht, Schwab & Gubler 2016.

[Herleitung von Schätzwerten für Lagerungsdichte und Raumgewicht Feinerde:](#)

[Pedotransferfunktionen für landwirtschaftlich genutzte Böden der Tiefe 0-20 cm](#)

Bericht, Schwab & Gubler 2019.

[Messung des Eindringwiderstands und des Bodenwasserzustandes. Methodenvergleich verschiedener Geräte und Verfahren](#)

Bericht, Schwab et al. 2018.

www.nabo.ch > [Monitoring](#) > [Physikalische Untersuchungen](#)

6 Stoffflüsse: Bilanzierungen ergänzen die Probenahme vor Ort

Die Böden der NABO-Standorte werden regelmässig beprobt. Zusätzlich wird von mehr als 40 landwirtschaftlich genutzten Standorten die Bewirtschaftung erfasst. Hierzu werden die Landwirte, welche diese Standorte bewirtschaften, jährlich zur Nutzung befragt. Die Bewirtschaftungsdaten dienen insbesondere dazu, Mengenflüsse von Nähr- und Schadstoffen abzuleiten. Mithilfe dieser Stoffflussanalysen können Ursachen gemessener Konzentrationsveränderungen im Boden ermittelt und künftige Konzentrationsverläufe anhand von Nutzungsszenarien prognostiziert werden. So kann die Effektivität verschiedener Massnahmen zur Vermeidung von Schadstoffanreicherungen im Boden evaluiert werden. Dies stellt für einen vorsorgeorientierten Bodenschutz eine wichtige Grundlage dar. Dank der Stoffbilanzierungen lässt sich die künftige Entwicklung der Böden besser abschätzen.

Die Nationale Bodenbeobachtung sammelt neben gemessenen Bodendaten auch weitere Informationen an ausgewählten Messstandorten. Dieses indirekte Monitoring umfasst eine Befragung zur Bewirtschaftung von derzeit 46 landwirtschaftlich genutzten NABO-Standorten. Es hat den Zweck, die Nähr- und Schadstoffflüsse abzuschätzen und so die Entwicklung des Bodenzustands vertieft zu beurteilen (Gross et al. 2021a). Dazu werden die Landwirte der ausgewählten Parzellen regelmässig befragt, unter anderem über den Anbau von Nutzpflanzen (Saat- und Erntegut), den Einsatz landwirtschaftlicher Hilfsstoffe (Dünger und Pflanzenschutzmittel) sowie die Bodenbearbeitung (Gross et al. 2021b). Mit Hilfe dieser Daten kann sodann abgeschätzt werden, welche Mengen der einzelnen Nähr- und Schadstoffe via Hofdünger, Mineraldünger, Recyclingdünger und Pflanzenschutzmittel in den Boden gelangen, und wie viel davon via Erntegut wieder ausgetragen wird (Abbildung 12).

Die folgenden Unterkapitel fassen die Ergebnisse des jüngsten Stoffflussberichts (Gross et al. 2021a) zusammen. Die Resultate aus dem indirekten Monitoring liegen für 1985 bis 2017 vor; sie konzentrieren sich auf die Nährstoffe Stickstoff (N), Phosphor (P) und Kalium (K) sowie auf die Schwermetalle Kupfer (Cu), Zink (Zn), Cadmium (Cd) und Uran (U). Die Stoffflüsse sind als Oberflächenbilanzen mit den jährlichen Ein- und Austrägen der Nährstoffe und Schwermetalle angegeben. Von besonderem Interesse sind die Nettoflüsse der einzelnen Parzellen: Sind sie positiv, ist der Eintrag grösser als der Austrag. Negative Nettoflüsse geben das umgekehrte Verhältnis wieder.

Für die Oberflächenbilanzen von Kupfer, Zink und Cadmium werden auch Einträge über die Luft berücksichtigt. Die Deposition wird anhand von Daten des Nationalen Beobachtungsnetzes für Luftfremdstoffe (NABEL) abgeschätzt (BAFU & Empa 2016).

Resultate der Stoffflussanalysen von Schwermetallen werden derzeit für landwirtschaftliche Standorte mit den Ergebnissen der Bodenanalysen verglichen. Ziel ist es, unser Verständnis der Zusammenhänge zwischen der Bewirtschaftung und des Bodenzustandes so zu nutzen, dass wir Prognosen über künftige Konzentrationsverläufe unter verschiedenen Nutzungsszenarien machen können. Resultate sind im Jahr 2022 zu erwarten (siehe auch Unterkapitel 8.3).



Abbildung 12: In den Bewirtschaftungsdaten werden die Einträge von landwirtschaftlichen Hilfsstoffen und auch Erntemengen erfasst, die beispielsweise beim Schnitt einer Wiese anfallen.

6.1 Teilweise deutliche Überschüsse an Kupfer und Zink

Für 46 NABO-Standorte liegen Daten zur landwirtschaftlichen Nutzung vor. Die daraus abgeschätzten Oberflächenbilanzen zeigen: Die Nettoflüsse für Kupfer und Zink schwanken über die Jahre, aber sie nehmen nicht ab (siehe Abbildung 13). Auf 10 bis 30 % der Parzellen sind die Nettoflüsse erhöht respektive stark erhöht (siehe Abbildung 13: orange respektive rot eingefärbt). Kupfer und Zink gelangen auf Acker- und Graslandstandorten hauptsächlich mit dem Hofdünger in den Boden, im Rebbau durch Fungizideinsatz. Der Zusammenhang zwischen der Anzahl Nutztiere pro landwirtschaftliche Fläche und der Menge des ausgebrachten Hofdüngers kann als signifikant beurteilt werden (Gross et al. 2021a).

Die Nettoflüsse von Cadmium erreichten ab Ende 1980er-Jahre bis Mitte 1990er-Jahre auf bis zu 30 % der Parzellen ein ebenfalls erhöhtes bis stark erhöhtes Niveau. Seither nahmen sie auf vielen Parzellen jedoch deutlich ab, weil der Einsatz von Phosphor-Mineraldünger im Ackerbau in den 1990er-Jahren sank. Den Anstoß dazu gab wahrscheinlich eine Umstellung der betreffenden Landwirtschaftsbetriebe auf die Integrierte Produktion (IP) respektive die Einführung des ökologischen Leistungsnachweises (ÖLN). Ein weiterer Grund für die Abnahme der Cadmium-Einträge ist, dass geringere Mengen des Schwermetalls über die atmosphärische Deposition in die Böden gelangt sind.

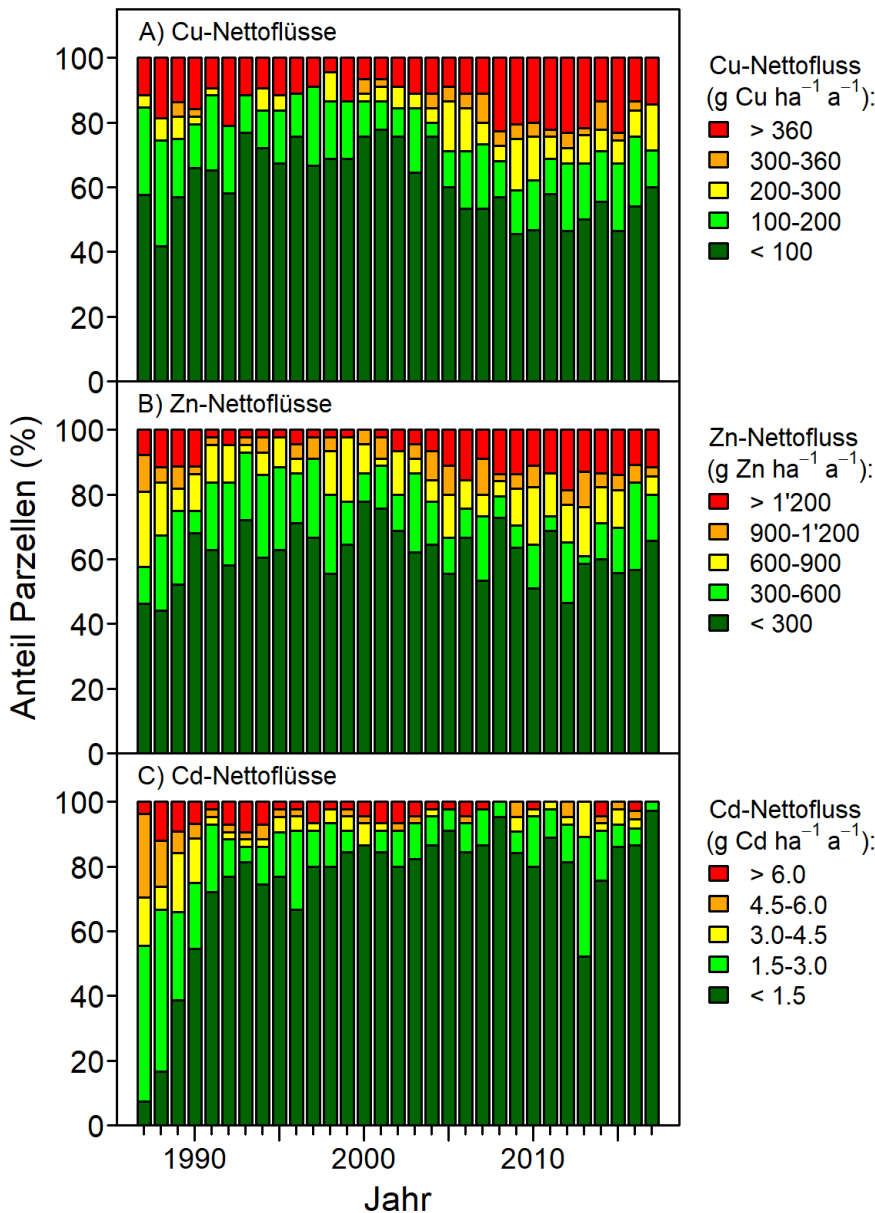


Abbildung 13: Zeitlicher Verlauf der Nettoflüsse von Kupfer (Cu), Zink (Zn) und Cadmium (Cd) auf NABO-Parzellen (n = 39 – 46); Mittelwerte der jährlichen Nettoflüsse für den Zeitraum 1987 – 2017.

Eine Grundlage zur Bewertung der Einträge von Schwermetallen in einen Boden kennt die Schweiz aktuell nicht. Dagegen legt Deutschland solche Grenzfrachten in der Bodenschutz- und Altlastenverordnung fest (BBodSchV 1999, Anhang 2, Nr. 5: "zulässige zusätzliche jährliche Frachten an Schadstoffen über alle Wirkungspfade"), die im Inland als Referenz für stark erhöhte Nettoflüsse herangezogen werden können. Der Vergleich der NABO-Oberflächenbilanzen mit den deutschen Werten erlaubt, die Nettoflüsse auf Schweizer Böden ihrerseits in geringere und grössere Frachten einzuteilen (siehe Abbildung 13). Dennoch genügt das nicht für eine Ableitung, wie die Bodenfruchtbarkeit langfristig beeinflusst wird. Eine solche Beurteilung erfordert zusätzliche Rechenschritte, unter anderem sind die bilanzierten Nettoflüsse pro Parzelle in theoretische Schwermetall-Akkumulationsraten umzurechnen. Diese Raten können danach mit Richtwerten für den Oberboden gemäss der nationalen Verordnung über Belastungen im Boden abgeglichen werden (VBBö 1998, Gross et al. 2021a).

Die Akkumulationsraten werden jeweils für ein Jahrzehnt berechnet, um jährliche Schwankungen auszugleichen, und um die langfristige Stoffanreicherungen im Oberboden grob abzuschätzen. Sie liefern Hinweise, welche Stoffflüsse und welche Böden sich langfristig problematisch entwickeln. Und ebenso wird aufgedeckt, welche Einflussfaktoren dafür hauptsächlich in Betracht zu ziehen sind, wie im Unterkapitel 6.2 ausführlicher beschrieben ist.

6.2 Hauptsächliche Einträge über Hofdünger und Pflanzenschutzmittel

Eine wichtige Erkenntnis aus den Messdaten des direkten Bodenmonitorings ist: Auf vielen Parzellen mit intensiver Graslandbewirtschaftung und mit ackerbaulicher Nutzung stiegen die Konzentrationen von Kupfer und Zink über die letzten Jahrzehnte (siehe Unterkapitel 8.3; Abbildung 20). Die aus dem indirekten Monitoring berechneten Akkumulationsraten bestätigen den Zusammenhang zwischen Landnutzung und Schwermetallkonzentration im Oberboden. Für sechs Grasland- und zwei Ackerbauparzellen betrug die Zunahmeraten zwischen 1 und 5 % des VBBö-Richtwerts. Auf beiden Nutzungstypen verursacht primär der Hofdünger die erhöhten Einträge von Kupfer und Zink (siehe Abbildung 14). Diese Schwermetalle sind elementare Spurenelemente und in Futtermitteln für die Viehzucht enthalten (Agroscope 2016, 2021). Weil die Tiere diese Elemente jedoch zu einem grossen Teil wieder ausscheiden (Schultheiss et al. 2004), gelangen sie via Hofdünger in den Boden. Die schwankenden Kupfer- und Zink-Nettoflüsse in Abbildung 13 können mit der Variabilität von Hofdüngergaben auf Graslandparzellen weitgehend erklärt werden (Gross et al. 2021a).

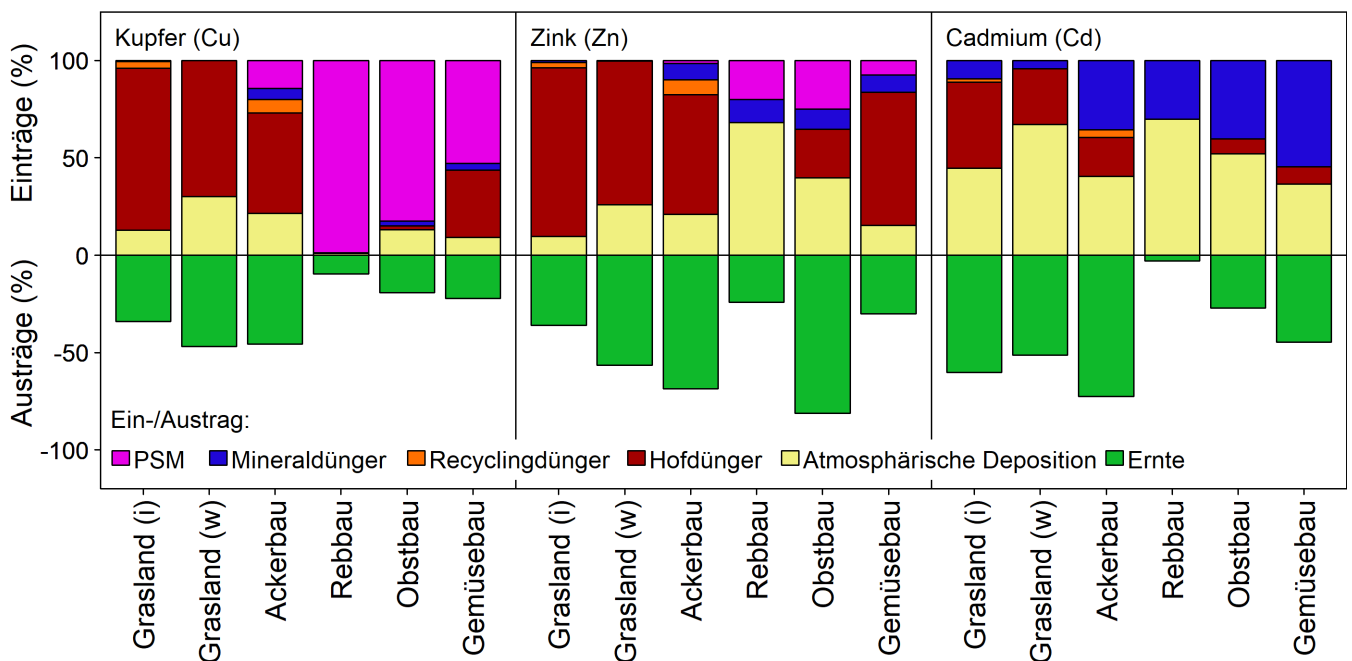


Abbildung 14: Ein- und Austräge von Kupfer (links), Zink (Mitte) und Cadmium (rechts) pro Landnutzung für die Periode 1985–2017 (Mittelwert pro Landnutzung und als Prozentwert der Gesamteinträge); Grasland (i) intensiv bzw. (w) = wenig-mittelintensiv bewirtschaftetes Grasland, PSM = Pflanzenschutzmittel.

Generell zeigt der Befund: Landwirtschaftsbetriebe mit vergleichsweise hoher Tierzahl pro Nutzfläche bringen mehr Hofdünger pro Fläche und Jahr aus. Dies ist grundsätzlich mit einer nachhaltigen Landwirtschaft vereinbar; eigener Hofdünger ist für die Nährstoffversorgung von Nutzpflanzen sehr wichtig und schliesst den Stoffkreislauf. Allerdings kann zu intensives Düngen die Einträge von Kupfer und Zink über Gebühr erhöhen (Gross et al. 2021a). Dadurch ergeben sich über die Jahre deutliche Überschüsse für die beiden Schwermetalle auf intensiv bewirtschafteten Graslandparzellen.

Im Rebbau ist eine stärkere Kupferanreicherung zu erwarten. Die Akkumulationsraten auf drei für den Weinbau genutzten Parzellen erreichen effektiv 5 bis 15 % des VBBo-Richtwerts. Die hohen Raten, die jeweils auf ein Jahrzehnt ausgelegt sind, sind hier durch die Anwendung von Pflanzenschutzmitteln geprägt (siehe Abbildung 14). Dasselbe Bild zeichnet das direkte Monitoring auf diesen drei Rebbauparzellen: Die gemessenen Kupfer-Konzentrationen liegen deutlich oberhalb des VBBo-Richtwerts. Die Beprobung dieser Böden zeigt allerdings, dass die hohen Konzentrationen nicht nur auf die jüngere Nutzung, sondern auf eine langjährige Anwendung kupferhaltiger Pflanzenschutzmittel zurückzuführen sind.

Phosphorhaltige Mineraldünger können Cadmium und Uran enthalten. Allerdings gibt es grosse Wissenslücken, wie hoch der Gehalt dieser Schwermetalle in handelsüblichen Düngemitteln ist. Zwei Marktkampagnen (BLW 2015; Kanton Bern 2021) zeigten, dass viele Phosphordünger die geltenden Cadmium-Grenzwerte nicht einhalten. Zwar wurde eine Verbesserung über die letzten Jahre beobachtet, trotzdem enthielten gemäss der neuesten Messkampagne immer noch 16 % der untersuchten Mineraldünger zu viel Cadmium. Allerdings können weitere Quellen einen Eintrag von Cadmium in den Boden verursachen, darunter die atmosphärische Deposition (siehe Abbildung 14) und das Ausbringen von unbehandeltem Klärschlamm bis zum Ausbringungsverbot im Jahr 2006.

Seit Ende 1980er-Jahre ging der Einsatz von phosphorhaltigem Mineraldünger im Ackerbau zurück, was sehr wahrscheinlich auf eine Umstellung vieler Landwirtschaftsbetriebe auf Integrierte Produktion (IP) respektive die Einführung des ökologischen Leistungsnachweises (ÖLN) zurückzuführen ist. Diese Vorgaben setzen unter anderem eine ausgeglichene Düngebilanz pro Betrieb voraus. Auch die atmosphärischen Depositionen nahmen bis Mitte der 1990er-Jahre ab, weshalb die Zahl der Parzellen mit erhöhten oder stark erhöhten Cadmium-Nettoflüssen auch im NABO-Messnetz zurückgegangen ist (siehe Abbildung 13).

Tatsächlich zeigt das NABO-Monitoring der letzten zwei Jahrzehnte, dass die Ein- und die Austräge für Cadmium für viele Standorte beinahe ausgeglichen sind (siehe Abbildung 13: Cadmium-Eintrag kleiner als 1.5 g pro Hektar und Jahr) und auf wenigen Parzellen sogar leicht ins Negative kippt. Abhängig von der Parzelle und der geogenen Hintergrundbelastung sind zusätzliche Cadmium-Einträge trotzdem kritisch zu beurteilen.

Weiterführende Informationen

[Stoffbilanzen für Parzellen der Nationalen Bodenbeobachtung. Nährstoffe und Schwermetalle 1985-2017](#)

Bericht, Gross et al. 2021a.

[Erfassung der Bewirtschaftungsdaten im Messnetz der Nationalen Bodenbeobachtung NABO](#)

Bericht, Gross et al. 2021b.

www.nabo.ch > [Monitoring](#) > [Von Bewirtschaftungsdaten zu Stoffflüssen](#)

7 Hofdünger: Analysen verbessern die Stoffflussbilanzen

Ein grosser Teil der Nährstoffe gelangt mit Gülle und Mist in den Boden, ebenso wie einzelne Schadstoffe. Weil die Zusammensetzung der Hofdünger heterogen ist, lassen sich die tatsächlichen Stoffeinträge nur schwierig für einzelne Standorte abschätzen. Deshalb führte die Nationale Bodenbeobachtung NABO bereits zwei Messkampagnen durch, um den Hofdünger genauer zu analysieren. Dank der Stichproben für die NABO-Standorte sind die Grundlagen für eine Stoffbilanzierung besser geworden.

Die im Kapitel 6 («Stoffflüsse: Bilanzierungen ergänzen die Probenahme vor Ort») beschriebenen Oberflächenbilanzen sind mit Unsicherheiten behaftet. Zur Berechnung der Ein- und Austragsmengen werden oft ungenaue Angaben über Hofdünger (siehe Abbildung 15), Mineraldünger, Recyclingdünger, Pflanzenschutzmittel und über das Erntegut verwendet. Die Zusammensetzung der Düngemittel variiert natürlicherweise stark, ebenso wie die jeweils ausgebrachten Mengen. Wie sich solche Unsicherheiten auf eine Stoffbilanz auswirken, wurde mithilfe einer stochastischen Methode untersucht (Keller et al. 2005, Gross et al. 2021a). In der Unsicherheitsanalyse wurden neben den Mittelwerten auch die gesamten Wertebereiche und die statistischen Verteilungen der jeweiligen Stoffkonzentrationen verwendet. Daneben wurde auch die Datenqualität der Bewirtschaftungsangaben beachtet. So werden Landwirtschaftsbetriebe in der Regel jährlich befragt, wie häufig und in welchen Mengen sie Dünger und Pflanzenschutzmittel auf den NABO-Probestandorten ausbringen. Die NABO selbst macht es sich zur Aufgabe, die Qualität dieser Umfragedaten bereits während der Erfassung zu beurteilen und zu verifizieren. Dies zeigt, wie wichtig realitätsnahe Annahmen zur stofflichen Zusammensetzung, etwa der Hofdünger, für die Oberflächenbilanzen sind (Gross et al. 2021a). Abbildung 16 veranschaulicht dies beispielhaft für Graslandparzellen.



Abbildung 15: Eine möglichst genaue Charakterisierung von ausgebrachten Hofdüngern (Menge, Nährstoff- und Schwermetallkonzentration) ist zur Minimierung von Unsicherheiten bei Stoffbilanzierungen wichtig.

Da die Landwirtschaftsbetriebe ihrerseits nur Mengenangaben zu den ausgebrachten Düngern und Pflanzenschutzmitteln und zum Erntegut machen können, ist deren stoffliche Zusammensetzung genauer zu erkunden. Dafür werden Konzentrationen von Nährstoffen, Spurenelementen und Schadstoffen im Hofdünger mithilfe von Literaturrecherchen sowie eigenen Analysen (z.B. Hofdünger-Beprobungen) bestimmt. Daraus wird ersichtlich, dass viele Faktoren die Berechnung der Stoffflüsse prägen. Generell gilt jedoch: Wie viele Nährstoffe und Spurenelemente in den Boden gelangen, hängt wesentlich von der Intensität der Bewirtschaftung, der Tierhaltung, der Fütterung und

den Futtermittelzusatzstoffen sowie der Infrastruktur auf dem betreffenden Landwirtschaftsbetrieb ab (Menzi und Kessler 1998; Menzi et al. 1999; Schultheiss et al. 2004; Keller et al. 2005). Selbst das Haushaltsabwasser kann auf einem Bauernhof relevant sein, weil es häufig zur Verdünnung des Hofdüngers verwendet wird (Gross et al. 2021a, b). Dies unterstreicht, wie wertvoll eine periodische Beprobung von betriebsspezifischen Hofdüngern ist. Nur so kann die NABO die Unsicherheiten einer Stoffbilanzierung minimieren und parzellengetreu über die Nähr- und Schadstoffeinträge in den Boden informieren.

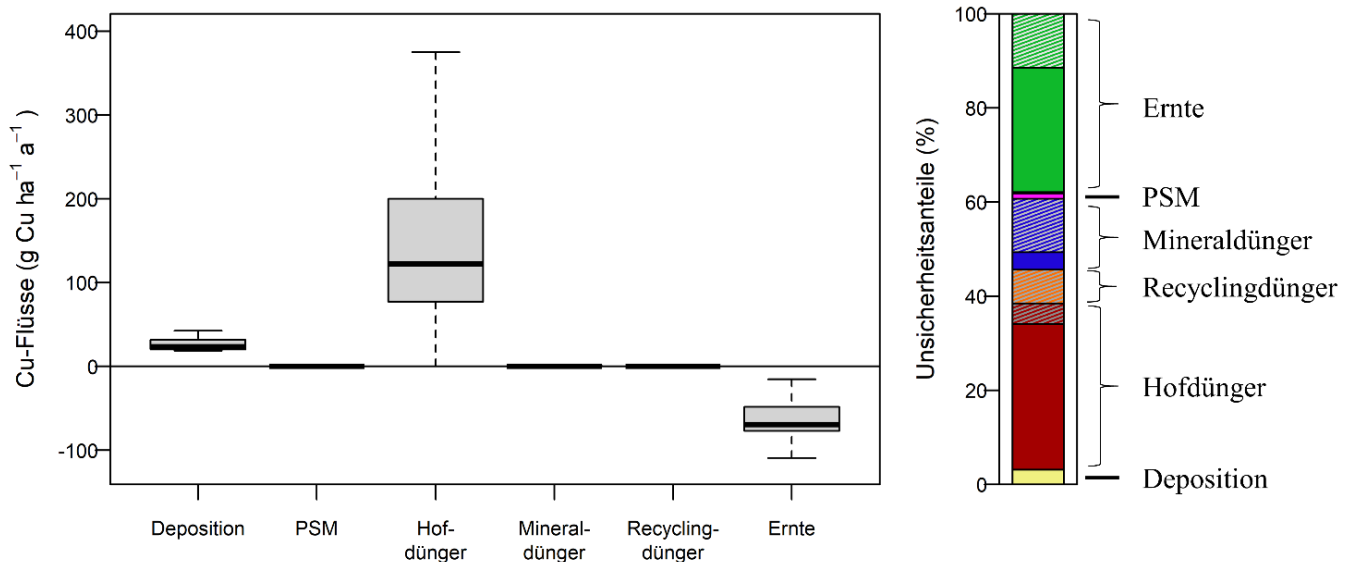


Abbildung 16: Die Boxplots jährlicher Ein- und Austräge von Kupfer (links) auf 12 Graslandparzellen von 1985 – 2017 (ohne Extremwerte). Die Unsicherheitsanalyse (rechts) zeigt schraffiert die Mengenunsicherheiten und in den nicht schraffierten Flächen die Unsicherheiten der Konzentrationsdaten.

7.1 Zwei NABO-Messkampagnen bestätigen die grosse Variabilität

Seit 2006 untersucht die NABO die Hofdünger auf ausgewählten Landwirtschaftsbetrieben, in denen sich ein Messstandort befindet. Der Hofdünger ist hauptsächlich Gülle und Mist von Rindern und Schweinen; teilweise wird er gemischt und als Mischgülle ausgebracht. Die Analysen werden in unregelmässigen Abständen gemäss der Methode von Menzi und Kessler (1998) durchgeführt, wozu die Konzentrationen der Trockensubstanz, der Nährstoffe und der Schwermetalle gemessen werden (Gross et al. 2021b). Tabelle 1 zeigt die Trockensubstanz sowie die Konzentrationen für Phosphor, Kupfer und Zink in der Rinder-, Schweine- und Mischgülle. Die Werte stammen von 14 NABO-Betrieben, die 2006 beprobt wurden, und von weiteren 30, die 2018 beprobt wurden. Mist wurde nur vereinzelt analysiert. Diese Resultate sind hier nicht dargestellt.

Die Messwerte für die Trockensubstanz und die Schwermetalle im Hofdünger zeigen erwartungsgemäss eine grosse Streuung. So befanden sich im Durchschnitt 29 bzw. 41 mg Kupfer (Cu) in 1 kg Trockensubstanz (kg_{TS}) der Rindergülle, je nach Messkampagne 2006 bzw. 2018. Die Bandbreite reichte von 22 bis 101 mg Cu/ kg_{TS} (siehe Tabelle 1).

Die Messwerte für die Nähr- und Schwermetallgehalte sind früheren Studien für Schweizer Landwirtschaftsbetriebe ähnlich. Vor über 20 Jahren haben Menzi und Kessler (1998) die Gülle von Milchkühen analysiert. Bei diesen 48 Stichproben lag der Median für Kupfer bei 37 mg/ kg_{TS} und für Zink bei 162 mg/ kg_{TS} . Die Gülle von Mastschweinen wurde anhand von 191 Stichproben beurteilt; der Kupfer-Median betrug 115 mg/ kg_{TS} , der Zink-Median 747 mg/ kg_{TS} . In dieser Studie sind auch Stichproben enthalten, die einige Landwirtschaftsbetriebe im NABO-Messnetz betreffen. Da die Tierhaltung und der Einsatz von Futtermittelzusätzen den Gehalt von Kupfer und Zink im Hofdünger beeinflussen, sind sie in der Schweiz teilweise geringer als in Ländern mit intensiverer Landwirtschaft (Schultheiss et al. 2004; Keller et al. 2005).

Tabelle 1 Trockensubstanz (TS)-, Phosphor (P)-, Kupfer (Cu)- und Zink (Zn)-Konzentrationen in der Gülle von Landwirtschaftsbetrieben des NABO-Messnetzes für 2006 (14 Betriebe) und 2018 (30 Betriebe); eine Stichprobe (n) entspricht dem Mittelwert von jeweils drei bis vier Unterstichproben pro Güllegrube (Std. = Standardabweichung).

Typ	Wert	2006				2018			
		TS (g _{TS} kg ⁻¹)	P (g kg _{TS} ⁻¹)	Cu (mg kg _{TS} ⁻¹)	Zn (mg kg _{TS} ⁻¹)	TS (g _{TS} kg ⁻¹)	P (g kg _{TS} ⁻¹)	Cu (mg kg _{TS} ⁻¹)	Zn (mg kg _{TS} ⁻¹)
Rinder- vollgülle	n	7	7	7	7	22	22	22	22
	Minimum	3.8	4.8	21.7	89	0.8	3.8	20.8	84
	Maximum	7.7	9.9	40.3	513	9.5	12.7	100.9	426
	Median	5.0	7.6	27.7	108	4.3	7.8	37.1	178
	Mittelwert	5.2	7.3	28.5	176	4.3	7.9	41.1	188
	Std.	1.3	1.8	6.9	152	2.4	2.4	17.5	83
Schwei- negülle	N	6	6	6	6	11	11	11	11
	Minimum	1.0	13.0	72.8	512	0.8	9.9	71.6	309
	Maximum	8.0	22.7	193.8	3'463	12.3	24.3	225.3	979
	Median	3.3	18.5	114.2	868	3.2	14.2	122.0	557
	Mittelwert	3.6	18.7	119.9	1'286	4.1	15.4	119.6	615
	Std.	2.5	3.7	40.0	1'093	3.6	4.2	43.2	205
Misch- gülle	N	7	7	7	7	5	5	5	5
	Minimum	2.0	4.6	15.6	120	2.2	7.7	27.1	149
	Maximum	5.2	13.2	147.0	686	5.1	22.8	80.7	516
	Median	2.5	9.8	56.0	321	3.4	10.3	56.8	354
	Mittelwert	3.1	9.1	63.4	326	3.8	12.1	54.9	329
	Std.	1.4	3.2	43.0	217	1.2	6.1	23.2	174

Weiterführende Informationen

[Stoffbilanzen für Parzellen der Nationalen Bodenbeobachtung. Nährstoffe und Schwermetalle 1985-2017](#)

Bericht, Gross et al. 2021.

[Erfassung der Bewirtschaftungsdaten im Messnetz der Nationalen Bodenbeobachtung NABO](#)

Bericht, Gross et al. 2021.

www.nabo.ch > [Monitoring](#) > [Von Bewirtschaftungsdaten zu Stoffflüssen](#)

8 Schwermetalle: Neueste Erhebungen bestätigen positive und negative Trends

Seit Beginn der Bodenbeobachtung vor über drei Jahrzehnten wird die Schwermetallbelastung untersucht. Obwohl Schwermetalle wichtige Nährstoffe sein können, sind sie für Pflanzen und Tiere in zu hoher Dosis schädlich. Mittlerweile konnten sechs NABO-Messkampagnen abgeschlossen werden, teilweise liegen Ergebnisse der siebten Runde vor. Die jüngsten Erkenntnisse bringen gute und schlechte Neuigkeiten: Die Gehalte von Blei und Quecksilber schwinden weiter, derweil nehmen diejenigen von Kupfer und Zink zu.

Schwermetalle sind mehr, als ihre Bezeichnung andeutet. Einige sind essentielle Nährstoffe und für Flora und Fauna in geringen Mengen unverzichtbar. Allerdings können diese Elemente das Ökosystem bei zu hoher Konzentration beeinträchtigen sowie Pflanzen, Tiere und letztlich den Menschen schädigen. Einige Schwermetalle gelangen hauptsächlich aus geogenen Quellen in den Boden. So sorgt verwitterndes Muttergestein für natürliche Einträge von Chrom (Cr), Nickel (Ni) und Kobalt (Co), wobei ihre Gehalte gemäss dem NABO-Monitoring an den erfassten Standorten stabil bleiben. Deutliche Veränderungen lassen sich hingegen bei Metallen beobachten, die vornehmlich aus anthropogenen Quellen stammen. Blei (Pb) und Quecksilber (Hg) gelangen über die Luft in den Boden. Luftreinhaltemassnahmen begünstigten jedoch eine deutliche Abnahme der Blei- und Quecksilber-Einträge. Weitere Schwermetalle wie Kupfer (Cu) und Zink (Zn) gelangen mit dem Dünger, mit Pflanzenschutzmitteln und anderen landwirtschaftlichen Hilfsstoffen in die Böden. Deren Einträge nehmen teilweise deutlich zu.

Die Nationale Bodenbeobachtung führte von 1985 bis 2009 fünf Erhebungsrunden durch. Die Analysen umfassten diejenigen Schwermetalle, für welche die Verordnung über Belastungen des Bodens (VBBo 1998) einen Richtwert festsetzt. Die Auswertungen ergaben, dass Landnutzung und Bewirtschaftung wichtige Faktoren für die Entwicklung der Schwermetallgehalte sind (Gubler et al. 2015). Inzwischen wurde die Beprobung durch zwei weitere Runden im NABO-Messnetz fortgesetzt. Die folgenden Unterkapitel geben die Resultate der sechsten Kampagne von 2010 bis 2014 wieder; teilweise werden erste Analysen der siebten Runde präsentiert, die aus einer Beprobung der betreffenden Monitoring-Standorte zwischen 2015 und 2019 stammen.

Im Vergleich zu den früheren Erhebungen wurden die Schwermetall-Messungen optimiert. So werden nur mehr Standorte analysiert, die landwirtschaftlich bewirtschaftet werden oder sich in einem Stadtpark befinden. Waldstandorte sind davon ausgenommen, da der geringe Schwermetalleintrag aktuell keine negative Entwicklung erwarten lässt. Bei Bedarf sind archivierte Bodenproben für solche Standorte verfügbar.

Um die Entwicklung seit Mitte der 1980er-Jahre in sachgerechten und konsistenten Datenreihen abzubilden, halten die Probenahme, die Aufbereitung und die Analytik der Bodenproben strenge Standards ein. Nur wenn das Niveau der Erhebungsmethodik beibehalten wird, können Schwermetallanalysen aus unterschiedlichen Messperioden miteinander verglichen und die Resultate entsprechend referenziert werden (Meuli et al. 2014; Gubler et al. 2015).

8.1 Blei und Quecksilber: weiterhin rückläufige Gehalte im Boden

Die atmosphärische Deposition ist sowohl bei Blei als auch bei Quecksilber die Hauptquelle für einen Eintrag in die Böden (Keller et al. 2005). Das NABO-Monitoring zeigte nach fünf Erhebungsrunden jeweils abnehmende Bodengehalte. Die beiden Folgebeprobungen bestätigten diesen Trend: Die Konzentrationen im Oberboden sinken überwiegend (siehe Abbildung 17 und Tabelle 2). Deren Unterschiede sind für Standorte mit verschiedener Landnutzung wenig ausgeprägt. Einzelne Standorte mit Spezialkulturen weichen teilweise mit einem Ausschlag nach oben ab. Vertiefende Abklärungen zeigen jedoch, dass sich daraus keine langfristigen Trends für eine Anreicherung im Boden ableiten lassen. Die Variabilität der NABO-Daten ist im Wesentlichen auf standortspezifische Effekte zurückzuführen.

Zur Interpretation des abnehmenden Trends bei Blei und Quecksilber werden Informationen aus dem Nationalen Beobachtungsnetz für Luftfremdstoffe (NABEL) beigezogen. Demnach ist die Blei-Deposition über Feinstaubniederschläge heute 50 Mal geringer als vor 30 Jahren (BAFU 2019). Die Hypothese, dass eine geringere Luftverschmutzung auch zur Reduktion des Schadstoffeintrags in den Boden beiträgt, lässt sich mit den Daten zur Luftqualität und zur Deposition folglich bestätigen. Dass die Depositionsraten weiter rückläufig sind, weist auch das nationale Moos-Monitoring nach. So sank der durchschnittliche Quecksilber-Gehalt in Moosen von 2010 bis 2015 um 11 % (BAFU

2018). Dies ist nicht zuletzt den getroffenen Luftreinhaltmassnahmen zu verdanken. Das Verbot für bleihaltiges Benzin vor über zwei Jahrzehnten zeigt nun Wirkung, bei der Verbesserung der Lufthygiene und bei der Bodenqualität.

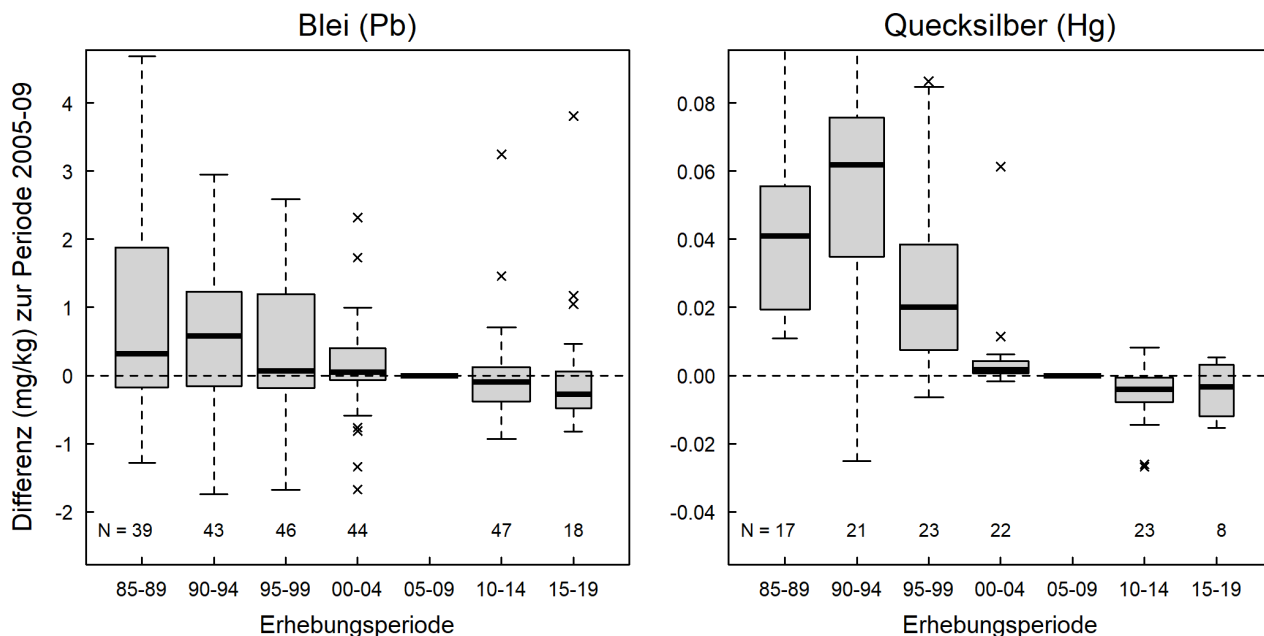


Abbildung 17: Boxplot mit den Konzentrationsänderungen (mg/kg) von Blei (Pb) und Quecksilber (Hg) im Oberboden (0 – 20 cm) auf landwirtschaftlich genutzten NABO-Standorten (Acker, Grasland, Spezialkulturen) und auf Parzellen von zwei Stadtpärken. Datengrundlage ist die Veränderung (absolut) der neuesten Standortmesswerte im Vergleich zur fünften Erhebungsperiode (2005 – 2009).

Tabelle 2: Die Gehalte von Blei (Pb) und Quecksilber (Hg) an NABO-Standorten, aufgeteilt nach Landnutzung; angegeben sind die Gehalte im Oberboden (0 – 20 cm) aus der sechsten Erhebung (2010 – 2014) und ihre Veränderung im Vergleich zur fünften Erhebung (2005 – 2009); n: Anzahl Standorte; Mw.: Mittelwert. (Für Hg sind die Daten von weniger Standorten verfügbar, da die Gehalte teilweise unter der Bestimmungsgrenze liegen.)

		N	Gehalt (mg /kg) in der 6. Erhebung			Veränderung (mg /kg) zur 5. Erhebung		
			Median	Mw.	(Min., Max.)	Median	Mw.	(Min., Max.)
Pb	Acker	25	19.9	21.6	(11.0, 31.9)	-0.09	-0.06	(-0.69, +0.71)
	Spez.kulturen	9	25.4	24.7	(17.6, 34.6)	-0.01	-0.06	(-4.87, +3.25)
	Grasland	11	22.6	25.2	(14.5, 47.1)	-0.35	-0.22	(-0.93, +0.38)
	Stadtpärke	2	94.7	94.7	(71.3, 118.1)	-3.10	-3.10	(-6.46, +0.26)
Hg	Acker	10	0.059	0.069	(0.022, 0.113)	-0.004	-0.005	(-0.026, +0.008)
	Spez.kulturen	2	0.166	0.166	(0.117, 0.215)	-0.001	-0.001	(-0.011, +0.008)
	Grasland	9	0.069	0.067	(0.046, 0.087)	-0.004	-0.005	(-0.015, +0.001)
	Stadtpärke	2	0.290	0.290	(0.220, 0.361)	-0.014	-0.014	(-0.027, 0.000)

8.2 Kupfer und Zink: eine Zunahme der Gehalte im Boden

Eine gegenläufige Entwicklung ist bei Kupfer und Zink zu beobachten. Wie Daten der sechsten und der teilweise ausgewerteten siebten NABO-Erhebungsrunde zeigen, nehmen die Gehalte im Oberboden vieler Ackerstandorte weiter zu (siehe Abbildung 18 und Tabelle 3). Die Veränderung fällt deutlich aus: Der Median der Zunahme beträgt für Kupfer 0.09 mg/kg und für Zink sogar 0.67 mg/kg. Die Böden von intensiv genutztem Grasland zeichnen ein ähnliches Bild (siehe Abbildung 19 und Tabelle 3). Der Zinkgehalt nimmt jedoch ausgeprägter zu als derjenige von Kupfer. Im Gegensatz dazu erscheinen die Kupfer- und Zink-Gehalte unter wenig intensiv genutztem Grasland in etwa stabil. Für Spezialkulturen mit Gemüse- und Rebbau lassen sich teilweise deutliche Steigerungen des Gehalts über die Zeit beobachten (siehe Tabelle 3). Allerdings ist die Zahl der beprobten Standorte derart gering und die Variabilität der Standortwerte im zeitlichen Verlauf derart hoch, dass daraus keine allgemeinen Erkenntnisse abgeleitet werden können. Detaillierte Auswertungen zur Entwicklung von Schwermetallgehalten im Oberboden der NABO-Standorte von 1985-2009 finden sich in Gubler et al. (2015). Zeitreihen bis 2019 werden derzeit ausgewertet und 2022 publiziert.

Tabelle 3: Der Gehalt von Kupfer (Cu) und Zink (Zn) an NABO-Standorten, aufgeteilt nach Landnutzung; die Gehalte gelten für den Oberboden (0 – 20 cm) und stammen aus der sechsten Erhebung (2010 – 2014), die Veränderungen ergeben sich aus einem Vergleich mit der fünften Erhebung (2005 – 2009); n: Anzahl Standorte; Mw.: Mittelwert.

		N	Gehalt (mg /kg) in der 6. Erhebung			Veränderung (mg /kg) zur 5. Erhebung		
			Median	Mw.	(Min., Max.)	Median	Mw.	(Min., Max.)
Cu	Acker	25	22.0	23.9	(10.1, 45)	+0.09	+0.15	(-0.44, +0.69)
	Gemüse	3	39.9	38.6	(32.2, 43.7)	+0.91	+1.30	(-0.11, +3.12)
	Obst	3	26.9	40.1	(22.8, 70.6)	+2.28	+3.46	(-0.35, +8.45)
	Reben	3	266.5	269.5	(230.2, 311.9)	+0.75	-0.70	(-10.24, +7.40)
	int. Grasland	6	26.6	26.3	(11.2, 40.2)	-0.18	+0.13	(-0.65, +1.76)
	wenig int. Grasland	5	11.0	13.7	(8.3, 23.1)	-0.14	-0.16	(-0.71, +0.15)
Zn	Acker	25	50.7	58.3	(37.7, 103.7)	+0.67	+0.83	(-0.55, +3.34)
	Gemüse	3	57.7	61.9	(51.2, 76.8)	+2.31	+1.87	(-0.23, +3.53)
	Obst	3	66.9	73.1	(57, 95.6)	-0.49	+1.34	(-3.52, +8.03)
	Reben	3	83.4	90.6	(80.5, 107.9)	+1.92	+3.25	(-0.48, +8.32)
	int. Grasland	6	91.7	89.2	(58.1, 111.4)	+2.36	+2.01	(+0.39, +3.77)
	wenig int. Grasland	5	59.1	64.8	(56.1, 76.2)	-0.25	+0.48	(-1.06, +2.56)

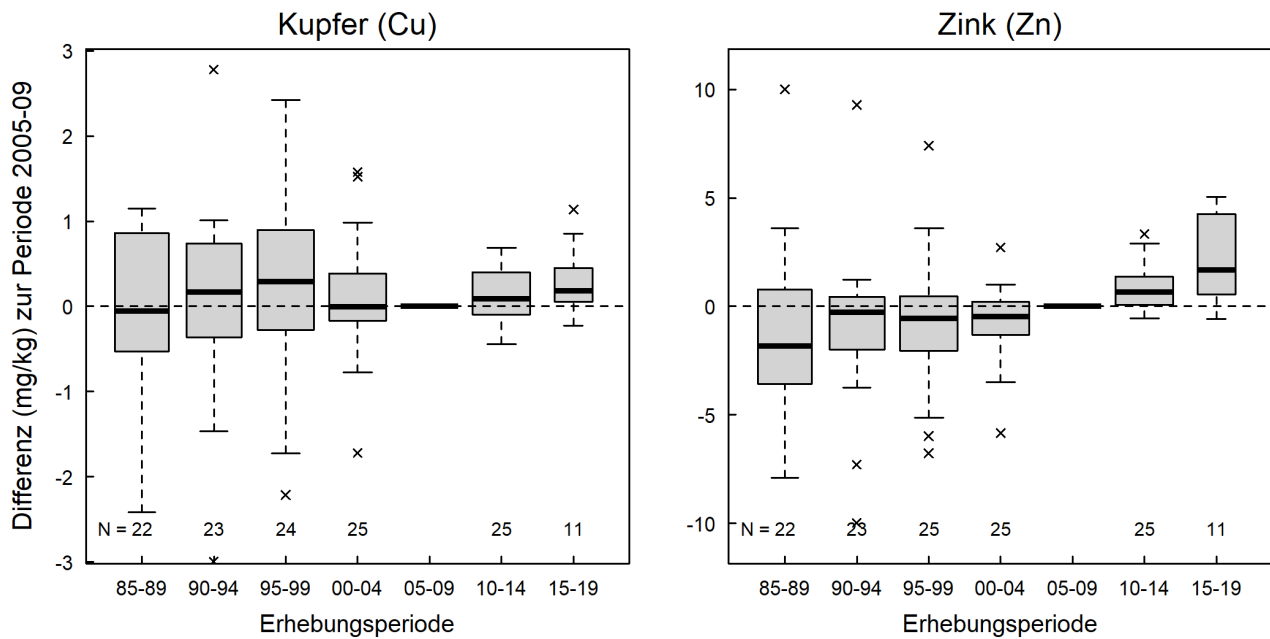


Abbildung 18: Boxplot mit Konzentrationsänderungen (mg/kg) für Kupfer (Cu) und Zink (Zn) im Oberboden (0 – 20 cm) auf Ackerstandorten im NABO-Messnetz. Datengrundlage ist die Veränderung (absolut) zur fünften Erhebung (2005 – 2009) pro Standort.

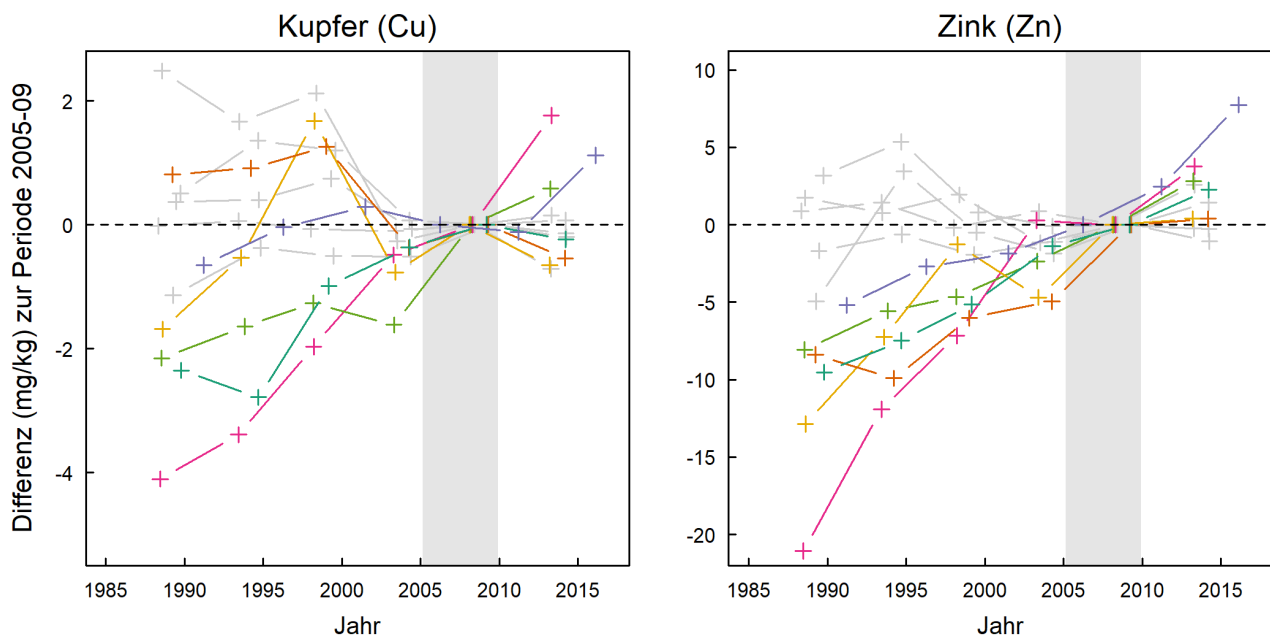


Abbildung 19: Konzentrationsverlauf (mg/kg) für Kupfer (Cu) und Zink (Zn) im Oberboden (0 – 20 cm) auf Graslandstandorten im NABO-Messnetz. Dargestellt ist jeweils die Veränderung (absolut) zur fünften Erhebung (2005 – 2009) pro Standort. Die Angaben für intensiv genutztes Grasland sind farbig, jene für wenig intensiv genutztes Grasland grau.

8.3 Kupfer und Zink: Woher stammen die zunehmenden Einträge?

Die Erkenntnisse aus den Oberflächenbilanzen für landwirtschaftlich genutzte Standorte, welche die NABO über ein indirektes Monitoring berechnet (siehe Kapitel 6), werden hier kurz rekapituliert: Auf Grasland dominieren die Einträge von Kupfer und Zink via Hofdünger. Für Spezialkulturen wie Gemüse-, Obst- und Rebbau gibt es unterschiedliche Eintragsquellen: Kupfer gelangt in der Regel mit dem Einsatz von Pflanzenschutzmitteln in den Boden. Zink stammt je nach Spezialkultur und Bewirtschaftungsform aus Pflanzenschutzmitteln, dem Hofdünger oder atmosphärische Deposition. An Ackerbaustandorten sind entweder Hofdünger oder Pflanzenschutzmittel respektive beide Quellen zusammen die wichtigsten Eintragsquellen. Die beobachtete Zunahme der Kupfer- und Zinkgehalte im Boden ist hauptsächlich auf die landwirtschaftliche Bewirtschaftung zurückzuführen. Die Einträge aus der Atmosphäre sind mengenmässig zweitrangig und in den letzten Jahren rückläufig (BAFU 2019).

Aufgrund der Oberflächenbilanzen kann für die NABO-Standorte auch abgeschätzt werden, wie sich die Schwermetallkonzentrationen im Boden theoretisch entwickeln sollten. Die modellierten Konzentrationen können mit den gemessenen Bodendaten verglichen werden. Für die Schwermetalle stimmen die modellierten und die gemessenen Konzentrationen auf Graslandparzellen erstaunlich gut überein (siehe Abbildung 20), obwohl die Oberflächenbilanzen die Verlagerung in tiefere Bodenschichten vernachlässigen. Die Modellierung erlaubt daher auch einen Blick in die Zukunft: Es können parzellenscharfe Angaben zur erwarteten Entwicklung der Schwermetallgehalte gemacht werden. Und nicht nur das; mit diesem Instrument kann die künftige Entwicklung auch für bestimmte Szenarien aufgezeigt werden, wie eine sich ändernde Bewirtschaftung oder neue gesetzliche bzw. sozio-ökonomische Rahmenbedingungen. Zu diesem Thema sind wissenschaftliche Arbeiten in Vorbereitung und werden voraussichtlich 2022 veröffentlicht.

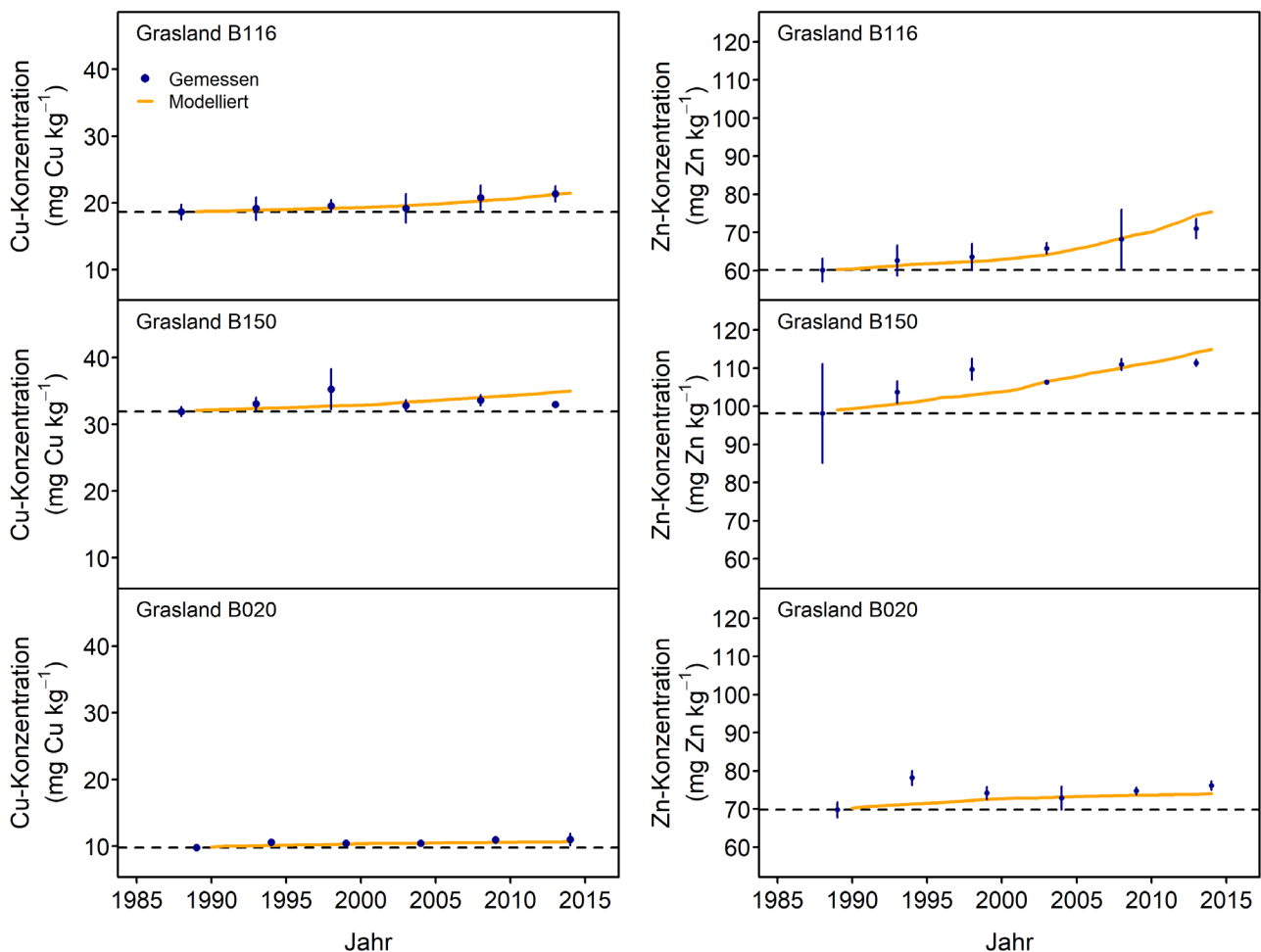


Abbildung 20: Die Entwicklung der gemessenen Gehalte an Kupfer (Cu) und Zink (Zn) im Oberboden (0–20 cm) auf drei ausgewählten NABO-Standorten seit Mitte 1980er-Jahre und der Vergleich mit der anhand von Oberflächenbilanzen modellierten Entwicklung (orange Kurve).

8.4 Ein Fazit nach drei Jahrzehnten: Schwermetalle bleiben für die Bodenbeobachtung relevant

Seit 36 Jahren erfasst das NABO-Monitoring die Schwermetallgehalte im Boden. Die oben ausgeführten Resultate der bisherigen Bodenbeobachtung zeigen: Die Einträge von Schwermetallen in die Böden bleiben ein aktuelles Problem. Diese Aussage bezieht sich insbesondere auf diejenigen Schwermetalle, die mit der landwirtschaftlichen Bewirtschaftung in den Boden gelangen und den nahezu geschlossenen Nährstoffkreislauf überfordern. Zwar halten die gemessenen, absoluten Gehalte die gesetzlichen Richtwerte gemäss VBBo in den meisten Fällen ein. Doch die nachgewiesene Zunahme des stoffspezifischen Gehalts bleibt insofern relevant, als er auch standortabhängig zu beurteilen ist. Die Landwirtschaft funktioniert nur dann nachhaltig, wenn sie eine kontinuierliche Anreicherung von Stoffen im Boden vermeiden kann. Ansonsten gefährdet sie die Bodenfruchtbarkeit langfristig.

In den letzten Jahren haben die Schweiz und die EU-Behörden zwar Massnahmen getroffen und Gehaltslimiten für Zink und Kupfer im Tierfutter verschärft. Trotzdem weist das NABO-Monitoring die stete Zunahme von Kupfer und Zink im Boden nach. Neben den Hofdüngern tragen auch Pflanzenschutzmittel diese Schwermetalle in die Böden ein. Dementsprechend ist weiterhin zu beobachten, wie sich gesetzliche und sozio-ökonomische Veränderungen in der Landwirtschaft auf den Einsatz von kupfer- und zinkhaltigen Produkten auswirken. Als weitere Vorsorgemassnahme ist zudem zu prüfen, ob die Schweiz eigene Referenzwerte für Grenzfrachten festsetzen kann, vergleichbar den Vorgaben in Deutschland.

Das Monitoring der (sinkenden) Blei- und Quecksilber-Gehalte im Boden zeigt im Vergleich dazu eine Perspektive auf, wie Böden mit wirksamen Massnahmen besser geschützt werden können. Erfolge in der Luftreinhaltung tragen viel dazu bei, dass die Blei- und Quecksilber-Gehalte im Oberboden inzwischen abnehmen. In diesem Sinn soll die landwirtschaftliche Bewirtschaftung auch nach direkten Möglichkeiten suchen, die Schwermetalleinträge in ihre Böden zu reduzieren.

Weiterführende Informationen

[Ergebnisse der Nationalen Bodenbeobachtung \(NABO\) 1985-2009. Zustand und Veränderungen der anorganischen Schadstoffe und Bodenbegleitparameter.](#)

Bericht, Gubler et al. 2015.

[Stoffbilanzen für Parzellen der Nationalen Bodenbeobachtung. Nährstoffe und Schwermetalle 1985-2017](#)

Bericht, Gross et al. 2021.

www.nabo.ch > [Monitoring](#) > [Stoffliche Untersuchungen](#)

9 Die organische Substanz des Bodens: auch für den Klimaschutz relevant

Währendem Moorböden fast vollständig aus abgestorbenen Pflanzenresten bestehen, macht die organische Substanz bei vielen Schweizer Böden nur ein paar wenige Prozente aus. Dennoch ist sie für die Bodenqualität zentral und wird von der Nationalen Bodenbeobachtung seit Beginn untersucht. Andere Umweltdisziplinen entdecken nun, wie wichtig solche Bodeninformationen sind. Weil die organische Bodensubstanz eine C-Senke respektive eine C-Quelle sein kann, arbeitet die NABO mit der Klimaforschung zusammen. Die Bodenbeobachtungsreihen fliessen in das Nationale Klimabeobachtungssystem und das Treibhausgasinventar ein.

Der Volksmund bezeichnet oft verallgemeinernd den gesamten fruchtbaren Boden als Humus. In der Bodenwissenschaft bezeichnet Humus hingegen die zersetzte organische Bodensubstanz. Dieser Anteil des Bodens stammt von Lebewesen (Pflanzen, Bodenorganismen usw.) und besteht zu wesentlichen Teilen aus Kohlenstoff. Der Humus beeinflusst die unterschiedlichsten Prozesse wie Nährstoffkreisläufe, den Wasserhaushalt und die Filterfunktion des Bodens massgeblich. Menge und Qualität der organischen Substanz sind für die Erhaltung der Bodenfruchtbarkeit sehr bedeutend. Die organische Substanz steht in Wechselwirkung mit Umweltfaktoren wie dem Klima und weiteren Bodeneigenschaften; auch die Bewirtschaftung – die Bepflanzung, die Bodenbearbeitung oder die Düngung – wirkt sich auf die organische Substanz im Boden aus.

Der Boden nimmt im globalen Kohlenstoff-Kreislauf einen wichtigen Platz ein. Kohlenstoff kann durch absterbende Pflanzenteile, durch Ausscheidungen der Wurzeln oder tierische Ausscheidungen in den Boden gelangen und sich in die organische Substanz einlagern. Umgekehrt entweicht Kohlenstoff als Kohlendioxid (CO_2), oder unter Abwesenheit von Sauerstoff als Methan (CH_4) in die Atmosphäre, wenn organische Bodensubstanz abgebaut wird. Die Zu- oder Abnahme des organischen Kohlenstoffs (C_{org}) im Boden ist deshalb für den künftigen Verlauf der Klimaerwärmung von Bedeutung.

Innerhalb des NABO-Monitorings rückte die organische Substanz im Lauf der Zeit in den Vordergrund: Zu Beginn wurde der C_{org} -Gehalt jeweils als Begleitparameter erhoben. Er war wichtig für die Beurteilung der Schadstoffgehalte an den Messstandorten. Inzwischen ist der Kohlenstoffgehalt selber von grossem Interesse. Die NABO-Zeitreihen zeigen die Entwicklung in den obersten 20 cm des Bodens seit den 1980er-Jahren. Weil die Probenahme seit 2010 auch die tieferen Bodenschichten einschliesst (siehe Kapitel 1), kann die NABO in Zukunft aufzeigen, wie sich die Kohlenstoff-Vorräte bis 75 cm Tiefe entwickeln. Die Ergebnisse sind in den folgenden Unterkapiteln dargestellt und erklärt.

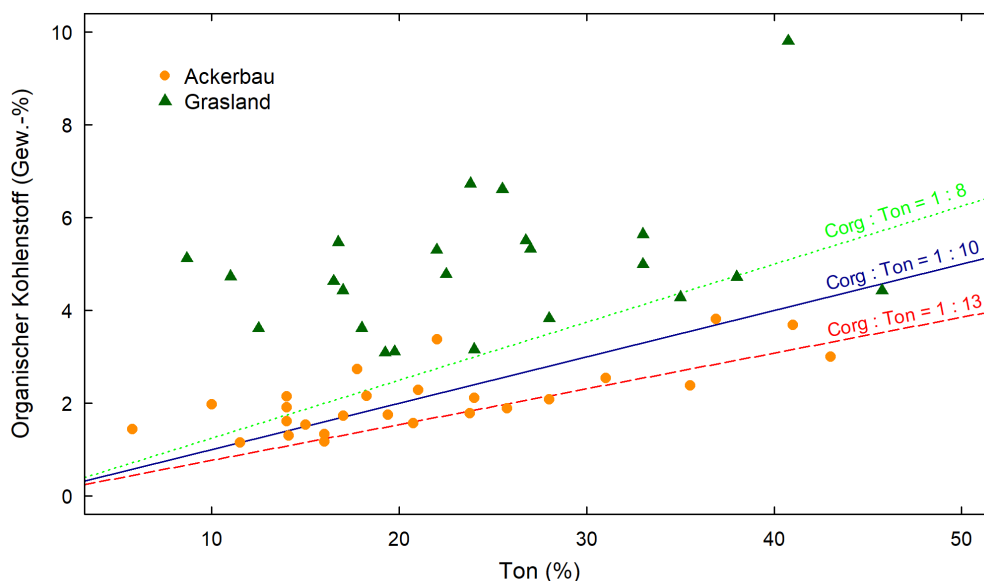


Abbildung 21: Der Gehalt von organischem Kohlenstoff (C_{org}) auf mineralischen Böden im Messnetz der NABO, in Abhängigkeit des Tongehalts für Acker- und Grasland-Standorte (Median pro Standort). Die Linien markieren die Grenzen zwischen den Klassen gemäss Johannes et al. (2017).

9.1 Ackerland: grosse Variabilität, aber insgesamt stabil

Der Kohlenstoff-Gehalt an den NABO-Ackerstandorten ist sehr variabel, sowohl im Vergleich zwischen den Standorten, als auch im zeitlichen Verlauf. Die 30 erfassten mineralischen Böden weisen C_{org} -Gehalte von knapp 1.2 bis 4 Gewichtsprozenten auf (Median: 2 Gew.-%). Der im Boden gespeicherte C_{org} -Anteil steigt unter anderem mit dem Tongehalt. Deshalb bedienen sich die Bodenwissenschaften eines Bewertungsansatzes, welcher die C_{org} -Gehalte im Kontext des jeweiligen Tongehalts beurteilt, indem das C_{org} :Ton-Verhältnis berechnet wird. Johannes et al. (2017) bewerten ein Verhältnis von 1:10 oder höher als Hinweis für eine qualitativ gute Bodenstruktur. Für die NABO-Acker-

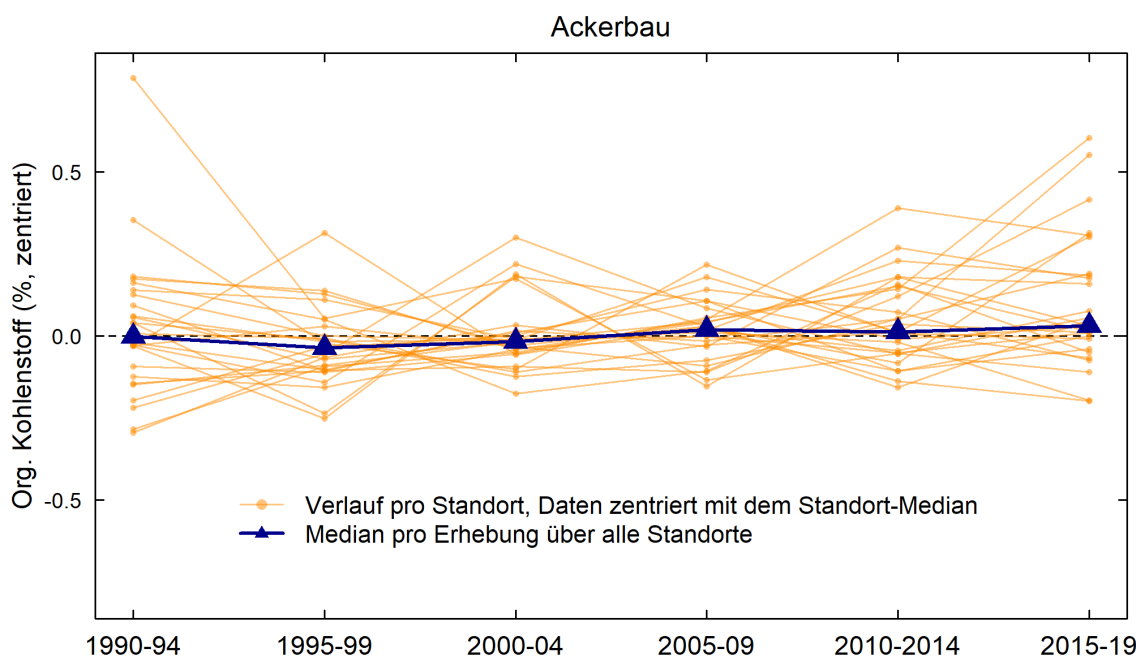


Abbildung 22: Zeitliche Entwicklung des organischen Kohlenstoffgehalts (C_{org}) für mineralische Ackerböden (0 – 20 cm Tiefe) im NABO-Messnetz von 1990 bis 2019 (zweite bis siebte Erhebung). Gezeigt wird jeweils der zentrierte Verlauf pro Standort (siehe Anhang 16.2) sowie der Median über alle Standorte.

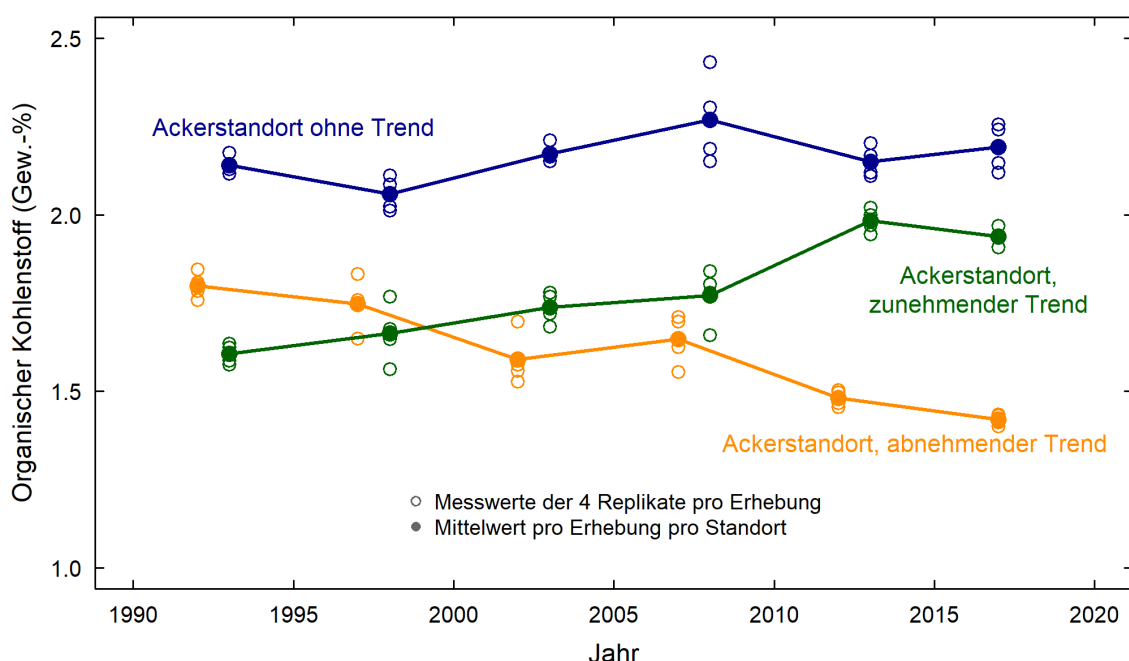


Abbildung 23: Die zeitliche Entwicklung des organischen Kohlenstoffgehalts (C_{org}) im Oberboden (0 – 20 cm) für drei ausgewählte NABO-Standorte mit ackerbaulicher Nutzung.

standorte liegt dieses Verhältnis zwischen 1:4 und 1:20 (Median: 1:11). Sandige Böden mit niedrigerem Tongehalt (unter 20 %) weisen dagegen häufig ein hohes C_{org} :Ton-Verhältnis auf. Im Vergleich dazu besitzen tonreichere Böden zu wenig C_{org} für ein «gutes» Verhältnis gemäss dieser Beurteilung (siehe Abbildung 21).

Die zeitliche Entwicklung des organischen Kohlenstoffs fluktuiert für einzelne Standorte relativ stark, zwischen den einzelnen Erhebungsrunden und im Vergleich zum langfristigen Trend des Gesamtkollektivs (siehe Abbildung 22). Die kurzfristigen Abweichungen geben einerseits saisonale Schwankungen wieder, andererseits spiegelt sich darin die Bewirtschaftung im Zyklus der Fruchtfolge mit unterschiedlichen Kulturen und Bodenbearbeitungsvarianten. Die langfristige Entwicklung seit Beginn der 1990er-Jahre bis 2014 wurde für Ackerböden vertieft untersucht. Gemäss dieser Studie (Gubler et al. 2019) war kein genereller Trend erkennbar; unter den Standorten fielen solche mit zunehmendem respektive abnehmendem C_{org} -Gehalt auf. Zudem gibt es Standorte, die keinen eindeutigen Trend zeigen. Abbildung 23 illustriert dazu drei Beispiele. Die Gründe lassen sich nicht für jeden Einzelfall identifizieren. Eine mögliche Ursache ist die Bewirtschaftungsänderung, besonders wenn dadurch die Menge des ausgebrachten Hofdüngers schwankt.

9.2 Grasland: Böden mit geringen Schwankungen im C_{org} -Gehalt

NABO-Graslandstandorte weisen deutlich mehr organische Substanz auf als Ackerstandorte. Auch das C_{org} :Ton-Verhältnis ist vergleichsweise höher (siehe Abbildung 21). Die absoluten C_{org} -Gehalte von Graslandböden liegen zwischen 2.9 und 10.6 Gew.-% (Median: 4.7 Gew.-%). Ansonsten zeigen sie ein sehr ähnliches Bild wie die Ackerstandorte, allerdings mit einem stabileren Gehalt des organischen Kohlenstoffs über die Zeit.

Die Werte aus den verschiedenen Erhebungsrunden weichen nur gering voneinander ab, woraus kein Trend ablesbar ist (siehe Abbildung 24). Die C_{org} -Gehalte nehmen für einzelne Standorte zu respektive ab; doch für die meisten Standorte bleibt der Gehalt stabil. Die Schwankungen sind zudem geringer als bei Standorten mit ackerbaulicher Nutzung. Dies dürfte primär daran liegen, dass auf Graslandstandorten stets dasselbe angebaut wird. Deren Böden werden nur vereinzelt bearbeitet wie etwa zu einer Neuansaat.

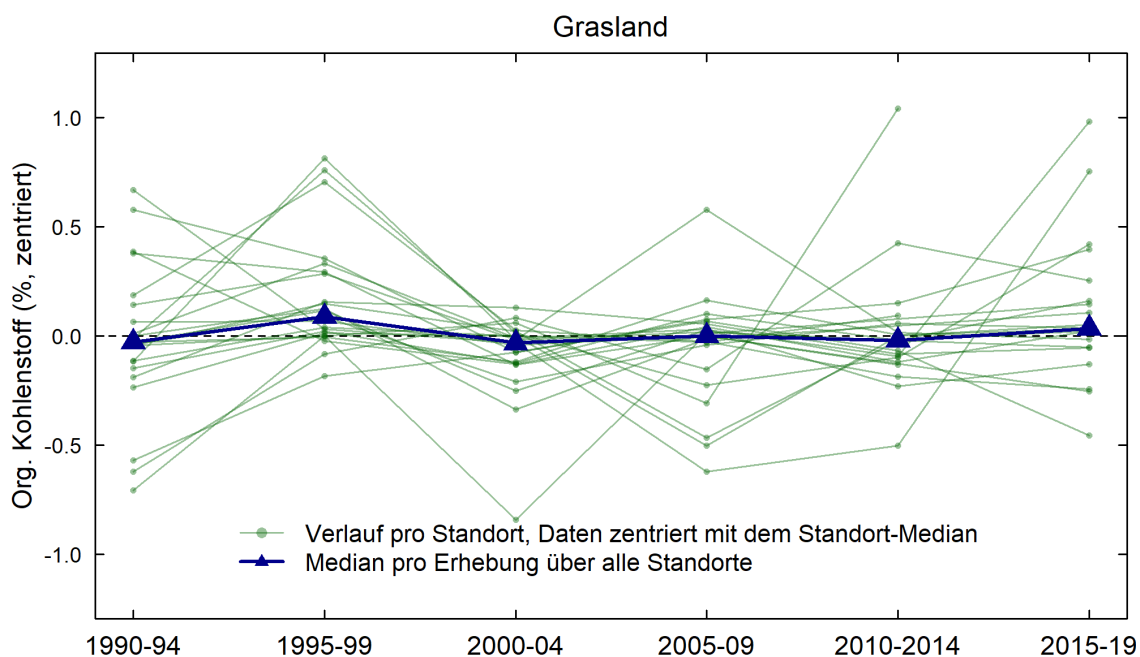


Abbildung 24: Die zeitliche Entwicklung des organischen Kohlenstoffgehalts (C_{org}) für mineralische Graslandböden (0–20 cm Tiefe) im NABO-Messnetz von 1990 bis 2019 (zweite bis siebte Erhebung). Gezeigt wird jeweils der zentrierte Verlauf pro Standort (siehe Anhang 16.2) sowie der Median über alle Standorte.

Abbildung 25 fasst die Erkenntnisse der NABO zum organischen Kohlenstoff folgendermassen zusammen. Die Böden von Acker- und Graslandstandorten zeigen ein heterogenes Muster, wobei die einzelnen Standorte zunehmende, stabile und abnehmende Tendenzen zeigen. Die C_{org} -Gehalte von Graslandböden sind stabiler: Signifikante Zunahmen respektive Abnahmen lassen sich nur auf wenigen Standorten beobachten. Der zeitliche Verlauf des C_{org} -Gehalts wird durch die Bewirtschaftung und vor allem durch einen Eintrag von Hofdünger auf relevante Weise beeinflusst.

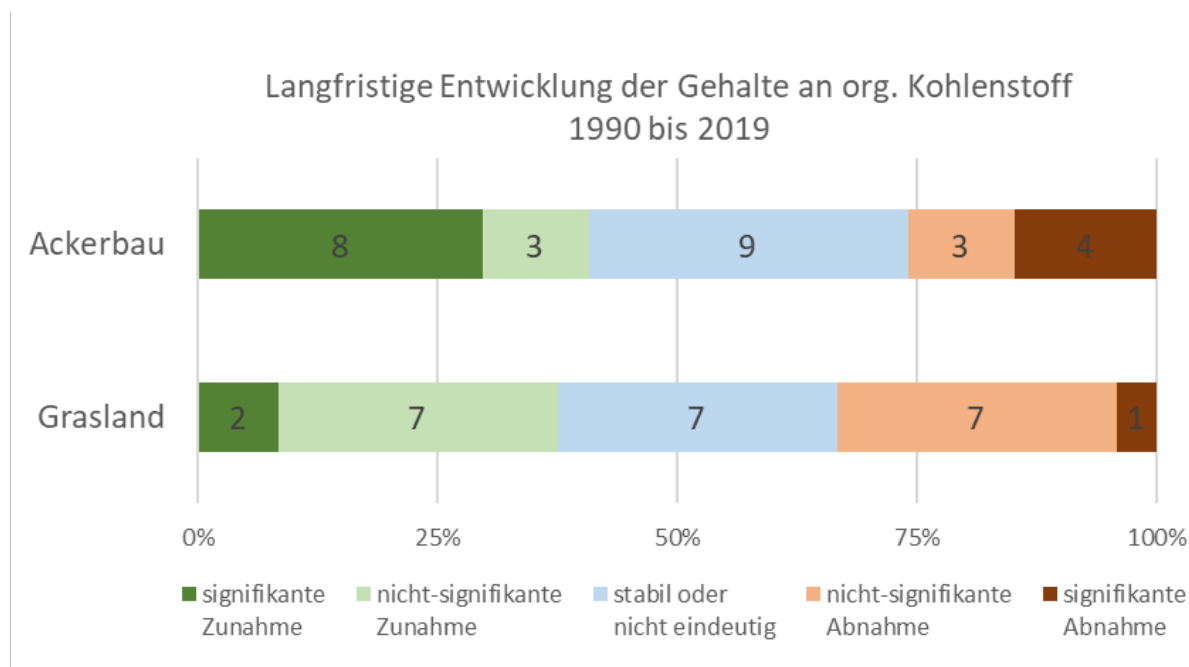


Abbildung 25: Die Entwicklung des Gehalts an organischem Kohlenstoff (C_{org}) für NABO-Standorte mit Acker- und Graslandnutzung; angegeben sind die Anteile der Standorte mit abnehmendem, stabilem respektive zunehmendem Trend.

Weiterführende Informationen

[Twenty-five years of observations of soil organic carbon in Swiss croplands showing stability overall but with some divergent trends.](#)

Wissenschaftlicher Artikel, Envir. Monitoring and Assessment, Gubler et al. 2019.

[Ergebnisse der Nationalen Bodenbeobachtung \(NABO\) 1985-2009. Zustand und Veränderungen der anorganischen Schadstoffe und Bodenbegleitparameter.](#)

Bericht, Gubler et al. 2015.

www.nabo.ch > [Monitoring](#) > [Stoffliche Untersuchungen](#)

10 Pflanzenschutzmittel: ein brisantes Thema nüchtern betrachtet

Ein Grossteil der angewendeten Pflanzenschutzmittel landet auf und im Boden. Deshalb erstaunt nicht, dass sich in vielen Böden der Schweiz geringe Rückstände nachweisen lassen. Um das Risiko einer Beeinträchtigung der Bodenqualität zu reduzieren, setzte der Bundesrat einen Aktionsplan in Kraft. Darin wird die NABO beauftragt, ein Monitoring der Pflanzenschutzmittelrückstände im Boden zu entwickeln und Indikatoren für die Auswirkungen auf die Bodenfruchtbarkeit verfügbar zu machen.

Am 13. Juni 2021 kamen zwei Volksinitiativen auf eidgenössischer Ebene zur Abstimmung, welche den Einsatz von Pflanzenschutzmitteln in der Landwirtschaft strenger regulieren wollten. Beide Vorlagen wurden abgelehnt. Aufgrund möglicher Belastungen für die menschliche Gesundheit und die Ökosysteme werden Pflanzenschutzmittel aber weiterhin sehr kontrovers diskutiert. Während das Verhalten und die Auswirkungen der darin enthaltenen Wirkstoffe auf Gewässer und aquatische Lebewesen vergleichsweise gut erforscht sind (Guzzella et al. 2018; Rösch et al. 2019; Curchod et al. 2020; Spycher et al. 2018), fehlen Daten, um den Einfluss auf die Bodenqualität abzuschätzen. Vorliegende Studien zeigen erst, dass Stoffrückstände in geringen Konzentrationen weit verbreitet sind (Chiaia-Hernandez et al. 2017; Humann-Guillemot et al. 2019; Riedo et al. 2021). Inwiefern die nachgewiesenen Rückstände ökologisch bedenklich sind, ist allerdings noch unklar.

2019 wurden in der Schweiz rund 1'950 Tonnen Pflanzenschutzmittel verkauft (BLW 2020). Hinter dieser Menge verbergen sich über 300 verschiedene Wirkstoffe, wobei auch solche für den biologischen Anbau mitberücksichtigt sind. Zwar sanken die Verkaufsmengen in der konventionellen Landwirtschaft von 2008 bis 2019 um rund 40 % (BLW 2020), die Mengenangabe alleine kann jedoch keine Aussage zur Auswirkung eines Wirkstoffs machen. So entfalten gewisse Wirkstoffe bei gleicher Menge eine viel grössere Wirkung als andere Wirkstoffe. Daher ist eine Einzelbetrachtung der verschiedenen Stoffe notwendig.

Der Einsatz von Pflanzenschutzmitteln wandelt sich stetig. Bedenklich eingestufte Wirkstoffe werden aus dem Verkehr gezogen; hingegen kommen neue Substanzen auf den Markt, die effizienter wirken und sich besser abbauen. Allerdings liegen nur spärliche Messdaten zur tatsächlichen Belastung von Böden mit Pflanzenschutzmitteln vor. Die NABO hat dazu eine Pilotstudie durchgeführt (Chiaia-Hernandez et al. 2017) und später um eine weitere Untersuchung ergänzt (Chiaia-Hernandez et al. 2020). Die Ergebnisse sind im Unterkapitel 10.1 dargestellt.

Da die Erhebung von Pflanzenschutzmitteln bisher nicht zum Standardprogramm des NABO-Monitorings gehört, ist ein Konzept in Ausarbeitung, welches diese zusätzlichen Datenerhebungen ermöglichen soll. Die Schweiz hat, wie die meisten europäischen Länder, bislang keine Grenzwerte für Pflanzenschutzmittel in Böden festgesetzt. Indikatoren für die Auswirkungen von PSM auf die Bodenfruchtbarkeit sollen im Rahmen des Aktionsplans Pflanzenschutzmittel (AP PSM) bis 2027 erarbeitet werden (siehe Kapitel 10.2.).

10.1 Erste Einblicke: ein Screening von Pflanzenschutzmitteln im NABO-Messnetz

Im Nachgang der Pilotstudie (Chiaia-Hernandez et al. 2017) wurde das Vorkommen von Pflanzenschutzmitteln im NABO-Messnetz in einem so genannten Screening vertieft untersucht. Eine solche Status-Untersuchung zeigt keine zeitliche Entwicklung auf, sondern fokussiert auf den aktuellen Zustand der Böden. Erhoben wurden Daten für 22 Acker-, 3 Obst- und 3 Weinbau-Standorte, zu welchen Informationen über die Bewirtschaftung verfügbar waren (siehe Kapitel 6). Die Bewirtschaftungsdaten erlauben unter anderem, jeweils einen Zusammenhang zwischen den gemessenen Konzentrationen in den einzelnen Böden und der Anwendung dieser Pflanzenschutzmittel herzustellen.

Screening Pflanzenschutzmittel		
Standorte	Proben	Analyse
22 Acker-, 3 Obstbau- und 3 Rebbau-Flächen im NABO-Messnetz	archivierte Proben aus 0 – 20 cm Tiefe, entnommen zwischen 2005 und 2009	Multi-Residue-Methode für 34 Wirkstoffe und 8 Abbauprodukte entwickelt durch die Umweltanalytik der Agroscope. Die Wirkstoffe wurden aufgrund der Mengen und Häufigkeit der Anwendung, der Verkaufszahlen, der Ergebnisse der Pilotstudie, von Expertenmeinungen sowie der analytischen Machbarkeit ausgewählt.

Dieser Vergleich ergibt folgendes Bild: Ab Mitte der 1980er-Jahre bis zum Zeitpunkt der Probenahme (2005 – 2009) wurden auf den 28 Feldern insgesamt 193 Anwendungen für die 34 analysierten Wirkstoffe gezählt (siehe Abbildung 26). In rund drei Viertel der Fälle konnten die entsprechenden Substanzen im Boden nachgewiesen werden. In den übrigen Fällen konnten die Pflanzenschutzmittel nicht mehr nachgewiesen werden: Die Substanz war bereits abgebaut oder ausgewaschen worden. Eine Analyse der Zeitspanne zwischen Anwendung und Probenahme verdeutlicht, dass Pflanzenschutzmittel persistent sind. Nur ein Viertel der Substanzen wurde frühestens zwei Jahre zuvor ausgebracht. Die Mehrheit der PSM stammte aus einer Zeit davor und deren Anwendung lag teilweise mehrere Jahre zurück. Die heutige Analytik vermag Pflanzenschutzmittel in sehr niedrigen Konzentrationen zu erkennen. Die Nachweisgrenze für die Messungen der NABO lag für die meisten Substanzen bei 0.3 µg/kg. Daher gelingt ein Nachweis selbst geringster Rückstände – und nach längerer Zeit, selbst wenn nur noch ein geringer Anteil der ursprünglich ausgebrachten Menge im Boden verbleibt. Ob diese Rückstände für die Ökosysteme ein Problem darstellen, ist nach wie vor umstritten und Gegenstand der aktuellen Forschung.

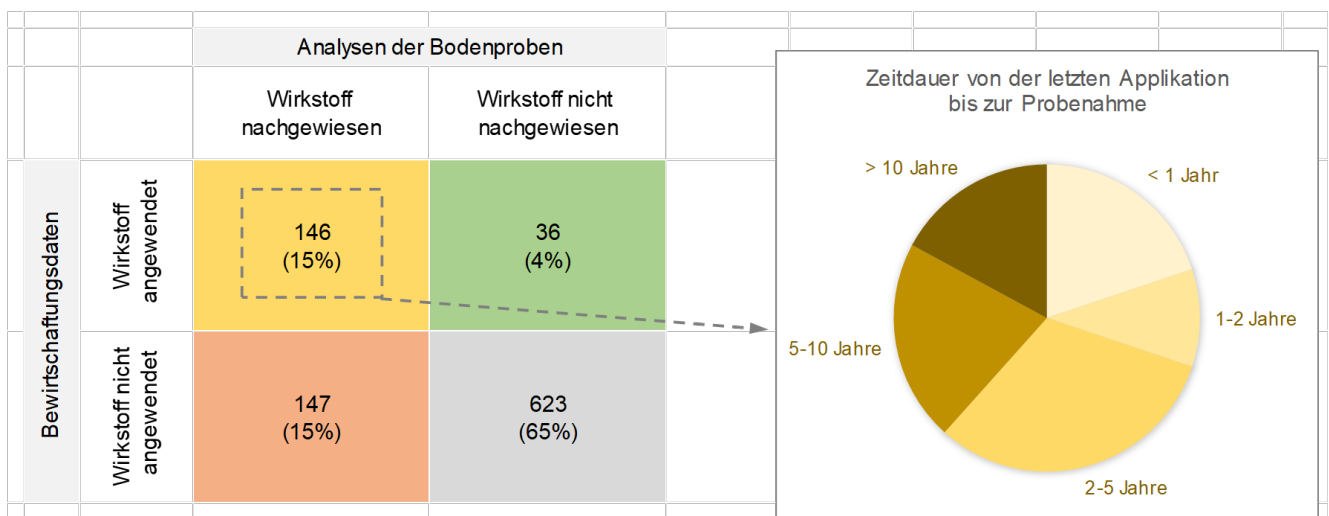


Abbildung 26: Links: Anwendung und Nachweis von Pflanzenschutzmitteln auf landwirtschaftlich genutzten NABO-Standorten (Acker, Obst- und Rebbau). Rechts: Verweildauer der gemessenen Pflanzenschutzmittel im Boden (dargestellt ist die Zeit zwischen der letzten bekannten Anwendung des Stoffs und der Probenahme).

Abbildung 26 zeigt ebenfalls: Relativ häufig wurden Substanzen nachgewiesen, die gemäss den nachgefragten Bewirtschaftungsdaten nicht ausgebracht wurden. Dieser Befund kann verschiedene Ursachen haben. In vielen Fällen darf der Nachweis mit Beizmitteln in Verbindung gebracht werden. Wie relevant dagegen eine Drift aus Nachbarparzellen oder ein anderer unbeabsichtigter Eintrag von ausserhalb ist, lässt sich zu diesem Zeitpunkt nicht abschliessend beurteilen. Generell kann die Ursachenforschung aber folgende Eintragsvarianten in Betracht ziehen.

- Einige Substanzen werden als Beizmittel für Saatgut eingesetzt. In den Informationen aus den nachgefragten Bewirtschaftungsdaten fehlen solche Hinweise jedoch häufig, weil sie oft nicht in Verbindung mit der Pflanzenschutzmittelanwendung gebracht werden.
- Pflanzenschutzmittelrückstände stammen möglicherweise aus einer Zeit vor 1985, als noch keine Informationen zur Bewirtschaftung erhoben wurden.
- Die Substanzen wurden von benachbarten Feldern (Drift) oder aus der Umwelt (beispielsweise Niederschläge) eingetragen. Ältere und neuere Studien belegen, dass das Regenwasser verschiedene Pflanzenschutzmittel enthält. Dies wurde für die Schweiz bereits vor über 20 Jahren dokumentiert (Bucheli et al. 1998) und kürzlich für aktuell eingesetzte Wirkstoffe bestätigt (Schläpfer et al. 2021).

Zur Illustration werden im Folgenden zwei Pflanzenschutzmittel genauer betrachtet: das Fungizid Tebuconazol, das etwa in Getreide-, Obst-, Gemüse- oder Blumenkulturen gegen Pilzbefall angewendet wird, sowie das Herbizid Terbutylazin, das ein Wachstum von Unkräutern und Gräsern in einer Maiskultur verhindern soll. Beide Pflanzenschutzmittel wurden nachgewiesen: Tebuconazol kommt mit Gehalten von 0.3 bis 173 µg/kg im Boden vor (Median: 1.5 µg/kg; Mittelwert: 27 µg/kg). Die Bandbreite beim Terbutylazin reicht von 0.5 bis 2.8 µg/kg (Median = Mittelwert: 1.7 µg/kg). Diese Konzentrationen sind sehr gut vergleichbar mit Resultaten anderer Studien aus der Schweiz und

Europa. Die Mittelwerte liegen relativ nahe beieinander (siehe Abbildung 27). Auffällig sind allerdings die vergleichsweise tiefen Gehalte der kürzlich veröffentlichten Studie über inländische Böden von Riedo et al. (2021): Dies erklärt sich dadurch, dass ein Drittel der dort untersuchten Standorte biologisch bewirtschaftet wird. Solche Böden weisen meist sehr tiefe Konzentrationen an Pflanzenschutzmitteln auf.

Zwischen den Höchstwerten der verschiedenen Studien zeigen sich grosse Unterschiede: Die jeweiligen Abweichungen und stärkeren Ausschläge entstehen wohl hauptsächlich durch die Terminierung der Probenahme. Im Winter liegt die letzte Anwendung von Pflanzenschutzmitteln oft mehrere Wochen oder Monate zurück. Eine Beprobung im Frühling oder Sommer findet möglicherweise nur wenige Tage nach der letzten Anwendung statt. Da für diese Studie Archivproben aus der regulären fünf Jahresbeprobung verwendet wurden, sind erhöhte Konzentrationen teilweise darauf zurückzuführen. Die NABO stimmte ihre Termine zur Probenahme für diese Studie nicht auf die Anwendung der Pflanzenschutzmittel ab. Deshalb sind höhere Konzentrationen auch hier teilweise saisonal begründet.

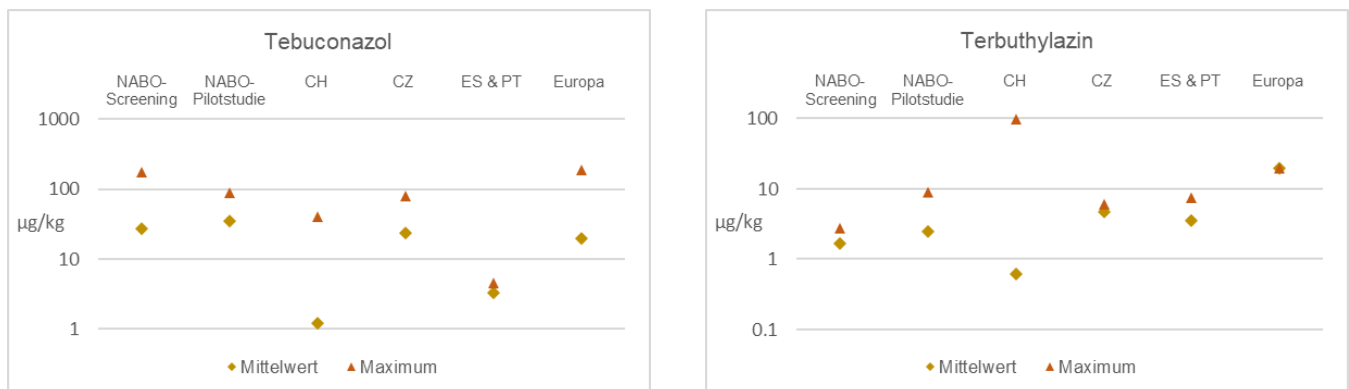


Abbildung 27: Die Messwerte für Tebuconazol (Fungizid) und Terbutylazin (Herbizid) im Boden; angegeben sind jeweils Mittelwert und Maximalwert der Konzentrationen aus verschiedenen Studien. Die Resultate des Screenings im Messnetz der NABO werden mit folgenden Studien verglichen: NABO-Pilotstudie (Chiaia-Hernandez et al. 2017), Untersuchung von Acker- und Gemüsebaustandorten in der Schweiz (CH; Riedo et al. 2021), Untersuchung von Ackerböden in der Tschechischen Republik (CZ; Kosubova et al. 2020), Untersuchung von Acker- und Gemüsebauböden in Spanien und Portugal (ES & PT; Sánchez-González et al. 2013), europäisches Screening von Ackerböden (Europa; Silva et al. 2019).

10.2 Aktionsplan Pflanzenschutzmittel: mehr Wirkstoffe und mehr Standorte

Pflanzenschutzmittel sollen nachhaltiger eingesetzt und die mit einer Anwendung verbundenen Risiken für die Umwelt reduziert werden. Dies verlangt der Bundesrat im Aktionsplan zur Risikoreduktion und nachhaltigen Anwendung von Pflanzenschutzmitteln (AP PSM). Hierzu hat er verschiedene Massnahmen definiert. Um die Belastung der Schweizer Böden mit Pflanzenschutzmitteln aufzuzeigen, sind sowohl der aktuelle Zustand zu erheben als auch die künftige Entwicklung und die Risiken abzuschätzen. Das Monitoring soll ein klar messbares Ziel kontrollieren: Der AP PSM verlangt, dass die Risiken durch den Einsatz von Pflanzenschutzmitteln bis 2027 zu halbieren sind.

Die NABO beabsichtigt, das Messnetz vor allem um Standorte mit Spezialkulturen (siehe Abbildung 28) zu erweitern. Dazu ist eine Zusammenarbeit mit den kantonalen Fachstellen geplant. Ebenso erwünscht sind Kooperationen mit Ressourcenprojekten, die von einzelnen oder mehreren Kantonen durchgeführt werden, wie zum Beispiel das Projekt «AquaSan», das Projekt «Reduktion von Pestiziden mit neuen Ansätzen» (PestiRed) und das Projekt «Optimierung und Reduktion des Pflanzenschutzmitteleinsatzes mit Precision-Farming-Technologien» (PFLOPF).

Die NABO gliedert ihr Mandat für den AP PSM in folgende Arbeitspakete auf:

- Bis Ende 2021 soll die Pflanzenschutzmittelanalytik für Böden weiterentwickelt werden. Künftig sollen rund 150 Wirkstoffe und Abbauprodukte im Boden gleichzeitig analysiert werden. Die Methode steht und wird nun validiert.
- Bis Ende 2022 folgen weitere methodische Abklärungen zur Ausgestaltung des künftigen PSM-Monitorings. Untersucht werden verschiedene Fragestellungen wie zum Beispiel die zeitliche Variabilität von PSM-Rückständen im Boden – im saisonalen Verlauf und im Jahresvergleich.

- Bis 2023 sollen Status-Erhebungen auf Obst- und Rebbau-Böden stattfinden. Die PSM-Belastung wird für rund 50 Standorte in- und ausserhalb des bestehenden NABO-Messnetzes untersucht.
- Bis 2023 soll eine Status-Erhebung auf Ackerbau-Böden stattfinden. Dafür wird die PSM-Beprobung auf Standorte ausserhalb des NABO-Messnetzes erweitert. Die Status-Erhebung wird in Kooperation mit dem Ressourcenprojekt «PestiRed» erfolgen.
- Bis 2023 soll eine Status-Erhebung auf Gemüsebau-Böden stattfinden. Analog zu den übrigen bodenspezifischen Status-Erhebungen wird die PSM-Belastung im Gemüsebau untersucht.
- Ab Ende 2024 will die NABO die Status-Erhebungen in ein langfristiges Monitoring überführen. Das Programm, unter anderem Umfang und Häufigkeit der Probenahmen, wird aufgrund der Erkenntnisse und der methodischen Abklärungen aus den Vorarbeiten bestimmt. Die Standorte der Status-Erhebungen und des bestehenden NABO-Messnetzes werden in ein künftiges Pflanzenschutzmittel-Monitoring integriert.

Der PSM-Aktionsplan verlangt zusätzlich, praxisbezogene Beurteilungsinstrumente für die Anwendung von Pflanzenschutzmitteln zu erarbeiten und fehlende Grundlagen zu ergänzen. Analog zu den geltenden Grenzwerten für Oberflächengewässer soll es künftig möglich sein, PSM-Konzentrationen im Boden anhand risikobasierter Referenzwerte zu beurteilen. Im Zentrum der gesuchten Bewertung werden Auswirkungen auf das Bodenleben stehen. Diese Arbeiten werden unter der Leitung des Schweizerischen Kompetenzzentrums für Ökotoxikologie (Oekotoxzentrum) und des Büros EnviBioSoil durchgeführt.



Abbildung 28: Um die Belastung mit Pflanzenschutzmitteln aufzuzeigen, werden Böden in- und ausserhalb des bestehenden Messnetzes der NABO beprobt, wie zum Beispiel an diesem Weinbau-Standort.

Weiterführende Informationen

[Long-Term Persistence of Pesticides and TPs in Archived Agricultural Soil Samples and Comparison with Pesticide Application.](#)

Wissenschaftlicher Artikel, Envir. Science & Technology, Chiaia-Hernandez et al. 2017.

[Aktionsplan Pflanzenschutzmittel](#)

www.nabo.ch > [Ergänzende Untersuchungen](#) > [Pflanzenschutzmittel](#)

11 Biodiversitätsmonitoring: Die Zusammenarbeit mit der Nationalen Bodenbeobachtung ist gefragt

In der Schweiz besteht ein grosser Mangel an flächendeckenden Bodeninformationen. Deshalb führten die NABO und das Biodiversitätsmonitoring Schweiz BDM ein Gemeinschaftsprojekt durch, wodurch an über 1'100 Standorten zusätzlich zu den Vegetationsaufnahmen jeweils Bodenproben entnommen, analysiert und archiviert wurden. Dieser erweiterte Pool an Bodendaten soll auch anderen Forschungs- und Vollzugsbereichen helfen, die Wissensgrundlage über Schweizer Böden zu verbessern.

Ein grosser Teil der Artenvielfalt verbirgt sich unter der Erdoberfläche. Doch bis heute vernachlässigt das Biodiversitätsmonitoring Schweiz BDM dieses Boden-Ökosystem. Lediglich ein Indikator (E6 «Nährstoffgehalt im Boden») liefert spezifische Informationen, indem der Nährstoffgehalt des Bodens anhand von Gefässpflanzen abgeschätzt wird (BDM 2014a). Zudem werden für den Indikator Z9 «Artenvielfalt in Lebensräumen» die Weichtiere (Mollusken) im Boden bestimmt (BDM 2014b). Doch bis vor kurzem wurden keine weiteren bodenspezifischen Angaben erhoben wie zum Beispiel der Säuregrad (pH-Wert), die Körnung und der Gehalt an organischem Kohlenstoff. In einem Gemeinschaftsprojekt konnten die Nationale Bodenbeobachtung und das Biodiversitätsmonitoring dieses Manko beheben. Von 2011 bis 2015 wurden die Vegetationsaufnahmen an 1'150 BDM-Standorten mit einer Beprobung des Bodens ergänzt. Die NABO organisierte die Probenahme und bereitete die Bodenproben so auf, dass sie auf die jeweiligen Bodenkenntwerte analysiert und die Proben archiviert werden konnten. Die Analyseergebnisse selbst sollen dem BDM zur Verfügung gestellt werden. Diese Zusammenarbeit soll einerseits dazu dienen, die pflanzensoziologischen Informationen mit Bodenkenntwerten zu verknüpfen, und andererseits soll ein schweizweit flächenproportionaler Bodendatensatz erstellt werden. Letzterer wird in Form des Geochemischen Bodenatlas Schweiz bis 2023 veröffentlicht.

Die Grundlagendaten können für weitere umweltrelevante Fragen der Wissenschaft und der Vollzugsbehörden zur Verfügung gestellt werden. Bundesämter können sie für gesamtschweizerische Analysen heranziehen. Kantone können sich dieser Informationen zur Unterstützung ihrer Vollzugs- und Reportingaufgaben bedienen. Die BDM-Bodendaten lassen sich zudem mit der europäischen Datenbank für räumliche Umweltdaten (INSPIRE, <https://inspire.ec.europa.eu/>) verknüpfen.

11.1 Schweizweiter Datensatz mit über tausend Bodenproben

Die von der NABO und dem BDM koordinierte Probenahme deckt die Vegetationsfläche der Schweiz sehr homogen auf einem Raster von 4 km x 6 km ab (siehe Abbildung 29). Unter den insgesamt 1'150 Standorten liegt der orografisch tiefste Punkt am Ufer des Langensees auf 199 Meter ü. M., der höchste in der Bündner Gemeinde Vals auf 2'741 m ü. M. Die mittlere Höhe aller Standorte liegt bei 1'068 m ü. M., was ziemlich genau der mittleren Höhenlage der Schweiz entspricht. An jedem Standort wurden nach Möglichkeit vier Proben aus dem Oberboden mit einer Schlagsonde bis in eine Tiefe von 20 cm entnommen (Meuli et al. 2017).

Die Rasterbeprobung für das BDM-NABO-Gemeinschaftsprojekt lässt erwarten, dass die hauptsächlichen Landnutzungen der Schweiz in etwa flächenproportional vertreten sind (siehe Abbildung 30). Insgesamt verteilen sich die BDM-NABO-Standorte zu je 41 % auf Landwirtschaftsgebiet und Wald. 9 % entfallen auf Alpweiden und 3 % auf den Siedlungsraum. Die Verteilung der Ackerstandorte ist jedoch sehr unterschiedlich ausgeprägt: Im Mittelland und Jura sind sie gut vertreten; weniger gut dagegen in den östlichen Zentralalpen sowie an den Alpenflanken im Norden und Süden. Abweichungen zur offiziellen Arealstatistik entstanden dadurch, dass nicht alle ausgewählten Standorte tatsächlich beprobt werden konnten. So liegen mehrere Punkte des Probenahmerasters im Siedlungsgebiet, auf Fels oder Schuttflächen, die nicht beprobt werden können.

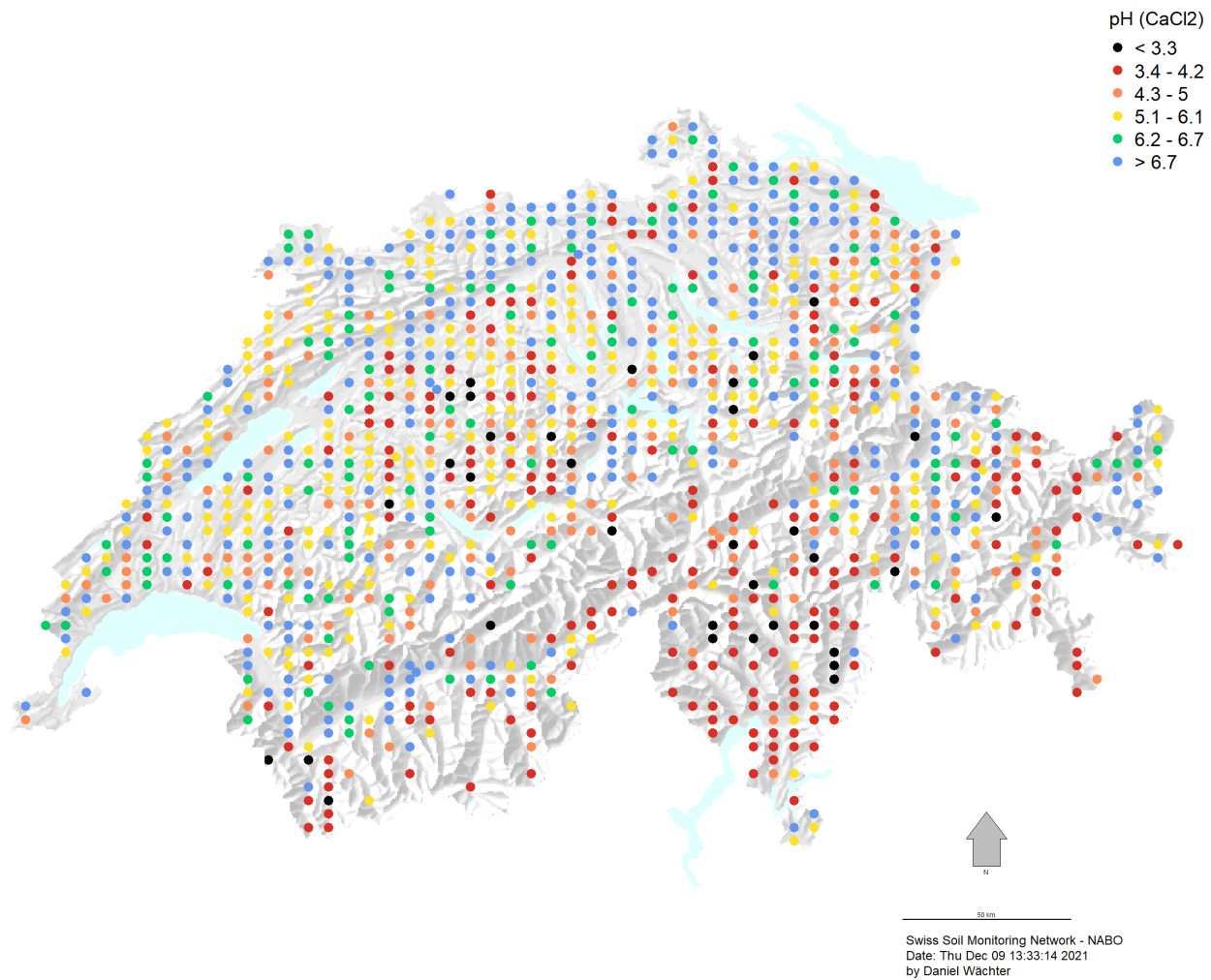


Abbildung 29: Der Säuregrad (pH-Wert) im Oberboden (in einer Tiefe von 0 bis 20 cm; Bestimmung in CaCl₂-Lösung) für rund 1'150 Standorte des Z9 Indikators des Biodiversitätsmonitoring BDM. Die Werte pro Standort sind über drei bis vier Einzelproben gemittelt.

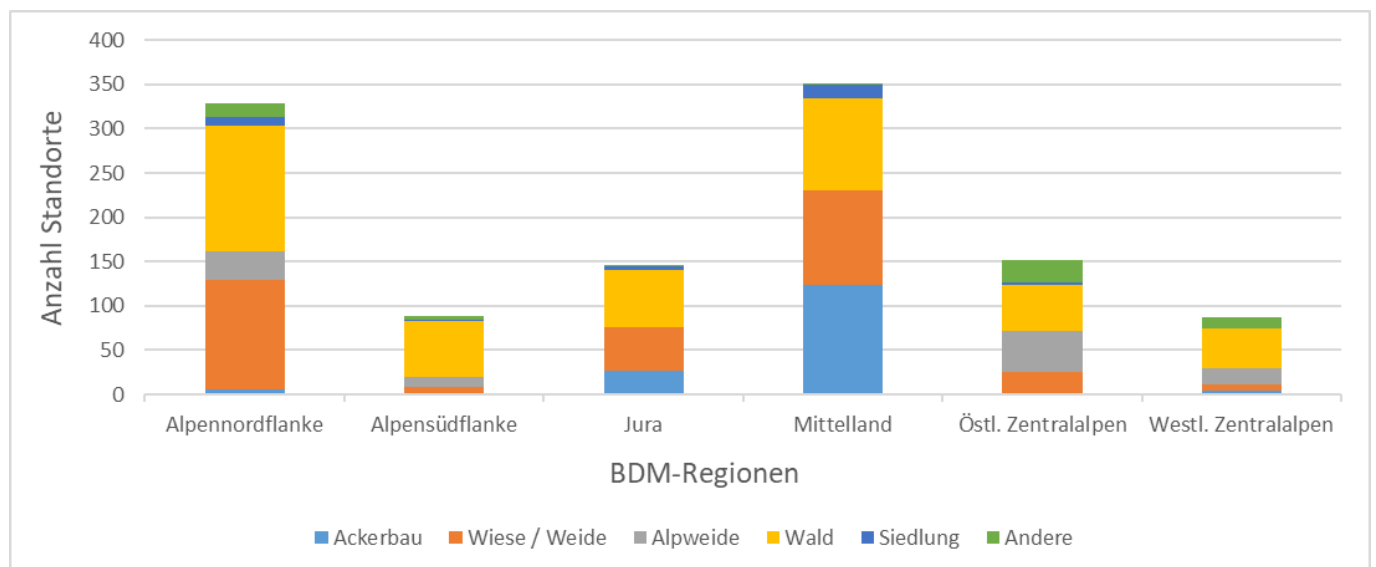


Abbildung 30: Übersicht der Messstandorte, differenziert nach Hauptnutzung und Regionen des NABO-BDM-Monitorings.

11.2 Grundlagen für weitere Untersuchungen

Der gemeinsame Datensatz der NABO und des BDM ist begehrt. Forschungsgruppen aus zahlreichen Institutionen nutzen ihn zur Plausibilisierung und Verfeinerung eigener Prognosemodelle. Decombes et al. (2020) haben zum Beispiel einen Vergleich der ökologischen Indikatoren nach Ellenberg mit den gemessenen Bodenkennwerten durchgeführt. Sie konnten die Vorhersagequalität für die Artenverbreitung verbessern. In einer weiteren Studie nutzten Stumpf et al. (2020) Daten zur Vegetation und zum Artenvorkommen und teilten das Grasland gemäss der Bewirtschaftungsintensität in unterschiedliche Klassen ein. Mayerhofer et al. (2021) haben Teile des Datensatzes dazu verwendet, die Prädiktoren für die räumliche Verteilung von Bakterienpopulationen mittels molekulargenetischer DNS-Sequenzierung zu untersuchen. Dasselbe Probesample wird für eine DNS-Sequenzierung von Pilzen analysiert. Die Resultate sollen zeigen, wie sich Pilze in der Schweiz verteilen und welche Rolle sie als Treiber der Biodiversität spielen. Ein Forscherteam der Universität Neuenburg will in den kommenden Jahren ein Nationales Inventar von Springschwänzen und Milben im Boden unter Zuhilfenahme der für das BDM erhobenen Bodenkennwerte entwickeln.

Der kombinierte Biodiversitäts-Boden-Datensatz ist in seiner räumlichen Auflösung einmalig. Er bildet zusammen mit weiteren Daten aus dem NABO-Monitoring die Grundlage für eine künftige Spektralbibliothek, in der Schweizer Böden im mittleren Infrarotbereich erfasst sind (Baumann et al. 2021). Im Rahmen des internationalen FAO-Projekts «GSOCseq» dient er der Agroscope zudem zur Validierung von Klimaschutzanalysen. Die Forschungsgruppe Klima und Landwirtschaft bei Agroscope berechnet dazu die Potentiale einer Kohlenstoffsequestrierung im Boden für verschiedene Bewirtschaftungsszenarien (C. Wüst, pers. Mitteilung). Auch der Geochemische Bodenatlas der Schweiz wird sich auf den NABO-BDM-Datensatz abstützen. Dieser Atlas darf als Meilenstein für den Vollzug des Bodenschutzes in der Schweiz bezeichnet werden. Darin werden die räumliche Verteilung von 22 Haupt- und Spurenelementen kartographisch wiedergeben. Die Auswertungen sind derzeit im Gang.

Weiterführende Informationen

[Environmental and anthropogenic factors shape major bacterial community types across the complex mountain landscape of Switzerland.](#)

Wissenschaftlicher Artikel, *Frontiers in Microbiology*, Mayerhofer et al. 2021.

[Developing the Swiss soil spectral library for local estimation and monitoring.](#)

Wissenschaftlicher Artikel, *Soil*, Baumann et al. 2021.

[Biodiversitätsmonitoring Schweiz BDM](#)

www.nabo.ch > [Ergänzende Untersuchungen](#) >

[Verknüpfung der NABO mit dem Biodiversitäts-Monitoring Schweiz BDM](#)

12 Zusammenarbeit in Europa: eine gemeinsame Statusuntersuchung mit den EU-Ländern

Die Nationale Bodenbeobachtung braucht den internationalen Vergleich nicht zu scheuen. Im Internationalen Jahr des Bodens 2015 beteiligte sich die Schweiz an der europaweiten Messkampagne LUCAS-Soil, die länderübergreifende Vergleiche im EU-Raum ermöglicht. Die inländische Bodenforschung findet dabei Gehör, weil sie eine Optimierung der Messmethoden vorschlägt. Eine Fortsetzung der Zusammenarbeit ist erwünscht.

Das europäische Projekt «Land Use/Land Cover Area Frame Survey» oder kurz «LUCAS» hat zum Ziel, die Landnutzung zu erheben und auch Veränderungen über die Zeit zu erfassen. Seit 2009 finden im Rahmen des Moduls «LUCAS-Soil» zusätzlich Bodenbeprobungen statt. Dabei werden die Bodeninformationen aus allen EU-Ländern in konsistenter Form erhoben und verfügbar gemacht (JRC-ESDAC, 2021). 2015 beteiligte sich die Schweiz am gesamteuropäischen Projekt. Zum damaligen internationalen Jahr des Bodens finanzierte das Bundesamt für Umwelt (BAFU) die einmalige Teilnahme. Für den nationalen Beitrag wurden 160 Messstandorte ausgewählt, welche den naturräumlichen Gegebenheiten der Schweiz wie Höhenstufe, Hangneigung, Landnutzung usw. gerecht werden sollten, und die darin möglichst regelmässig zu verteilen waren (siehe Abbildung 31). Da eine Probenahme in alpinen Regionen sehr aufwändig ist, und solche Zonen nur 3 % des gesamten europäischen Kontinents bedecken, fanden alle Erhebungen unterhalb von 1'500 m. ü. M. statt. Bezogen auf die Schweiz reduzierte sich das Untersuchungsgebiet somit auf 63 % der gesamten Landesfläche.

Die Zusammenarbeit im gesamteuropäischen Projekt liefert vergleichbare Informationen, weil sämtliche Bodenproben in einem zentralen Labor analysiert wurden. So sind Daten zu den chemischen und physikalischen Bodeneigenschaften für repräsentative Standorte in der Schweiz verfügbar, die mit Informationen aus den benachbarten Ländern harmonisiert sind. Nun sind direkte Vergleiche zu verschiedenen Bodenkennwerten wie der Gehalt an organischer Substanz, der Säuregrad oder die Körnung erlaubt. Insofern können die Folgen des Klimawandels auf unterschiedliche Naturräume für die Schweiz etwa auch im Rahmen von europäischen Erhebungen abgeschätzt werden kann. Dies ist ein erster Schritt, damit die Schweiz bei der künftigen Visualisierung von Bodeneigenschaften auf der Europakarte kein weisser Fleck mehr bildet.

Die gesamteuropäische Status-Untersuchung bildet ausserdem eine wichtige Basis für europäische Projekte der Bodenforschung, die im Rahmen des European Joint Programme Soil stattfinden (EJP Soil 2021). An diesem Forschungsprogramm beteiligen sich zahlreiche Forschungsgruppen aus der Schweiz. Deshalb ist eine Teilnahme der Schweiz an weiteren LUCAS-Soil-Probekampagnen von höchster Bedeutung.



Abbildung 31: Die Probennahme-Standorte in der Schweiz für das LUCAS-Soil-Projekt der EU sind als grüne Punkte dargestellt. Rot eingefärbt sind Gebiete über 1'500 m. ü. M., die ausserhalb des Untersuchungsperimeters liegen.

12.1 Ein erster Vergleich mit den Nachbarländern zeigt deutliche Unterschiede

Der Vergleich der Kennwerte für Ackerstandorte zwischen der Schweiz und den umliegenden Nachbarländern zeigt, dass die pH-Werte im Oberboden sehr homogen sind (siehe Abbildung 32 und Tabelle A 3, Anhang 16.3). Die Spanne zwischen Minimal- und Maximalwert reicht in der Schweiz von pH 4.6 bis 7.6 und ist damit ähnlich wie in Deutschland (pH 4.7 bis 7.7). Allerdings ist sie enger als in Italien (pH 4.2 bis 7.7) oder Österreich (pH 3.9 bis 7.6). Die Mediane liegen im Ländervergleich zwischen pH 6.3 und 7.0. Weiter auseinander liegen die Länder beim Gehalt an organischem Kohlenstoff (C_{org}) im Boden: Die geringste für Frankreich gemessene C_{org} -Konzentration (2.95 Gew.-%) übertrifft sogar die maximale Konzentration in Österreich (1.69 %). Der Median für die Schweiz (2.20 %) liegt derweil höher als der Median von Deutschland (1.73 %) und Italien (1.53 %); zudem ist er doppelt so hoch wie in Österreich (1.07 %). Die französischen Ackerstandorte weisen dagegen einen praktisch doppelt so hohen mittleren Gehalt (4.37 %) auf wie jene in der Schweiz. Für die fünf umliegenden Länder wurden insgesamt 324 Ackerstandorte auf mineralischen Böden untersucht.

Beim Vergleich der beprobten Graslandstandorte fallen deutlich tiefere pH-Werte auf, verglichen mit den Ackerstandorten (siehe Tabelle A 4). Im Weiteren nehmen die mittleren C_{org} -Gehalte in folgender Länderreihenfolge ab: Frankreich, Schweiz, Italien, Deutschland und Österreich (siehe Abbildung 32; Tabelle A 4; Anhang 16.3). Der Mittelwert in Österreich ist mit 0.96 % besonders niedrig. Damit erreicht er nur 15 % des Mittelwertes in Frankreich und etwa ein Drittel des Wertes für Italien und die Schweiz. Die ebenfalls erhobenen Tongehalte nehmen in folgender Reihenfolge ab: Österreich, Schweiz, Deutschland, Frankreich und Italien. Sämtliche Mittelwerte liegen relativ nah beieinander, in einem Bereich von +/- 14 bis 22 %. Die Graslandstandorte in Deutschland (mittlerer Sandanteil: 36 %) und Italien (33 %) sind im Mittel jedoch deutlich grobkörniger als Standorte in der Schweiz (23 %) und Österreich (19 %).

Der organische Kohlenstoff spielt eine Schlüsselrolle für den Erhalt von grundlegenden von Bodenfunktionen. Der obige Ländervergleich berücksichtigte Daten von jeweils 324 Acker- und Graslandstandorten. Dabei zeigt sich, dass der Bodenkohlenstoff bis in eine Tiefe von 20 cm praktisch für alle Landnutzungsklassen abnimmt, in der Reihenfolge: Frankreich vor der Schweiz, Italien, Deutschland und Österreich. In Frankreich werden jedoch systematisch höhere Kohlenstoffgehalte im Oberboden gemessen als in Österreich. Die Gründe für diese markanten Unterschiede können zum heutigen Zeitpunkt nur vermutet werden. Nicht zu unterschätzen ist etwa ein unterschiedlicher Bodenfeuchtegrad bei der Probenahme. Je nach Gehalt an Tongehalt und organischer Bodensubstanz kann dies massive Unterschiede bei der Probenahme verursachen (Meuli et al. 2014). Möglich sind auch Differenzen bei der Probenahmetechnik. Verschiedene Teams haben die Bodenproben in den jeweiligen Ländern und Regionen entnommen. Die verfügbaren Aufnahmeprotokolle, die einer gegenseitigen Orientierung dienen (LUCAS Soil Sampling Instructions 2012), werden im folgenden Unterkapitel diskutiert.

Für das Verständnis des Ländervergleichs ist folgendes anzumerken: Es sind nur Erhebungen aus denjenigen NUTS2-Regionen¹ innerhalb der Nachbarstaaten berücksichtigt, die direkt an die Schweiz angrenzen (siehe Tabelle A 2; Anhang 16.3). Somit sind die Vergleiche der Bodenkennwerte auch naturräumlich und/oder klimatisch sinnvoll und schlüssig. Der Einfachheit halber sind die Nachbarregionen jeweils «pauschal» mit dem Ländernamen bezeichnet.

¹ <https://ec.europa.eu/eurostat/de/web/nuts/background> - NUTS 2: Basisregionen für regionalpolitische Maßnahmen

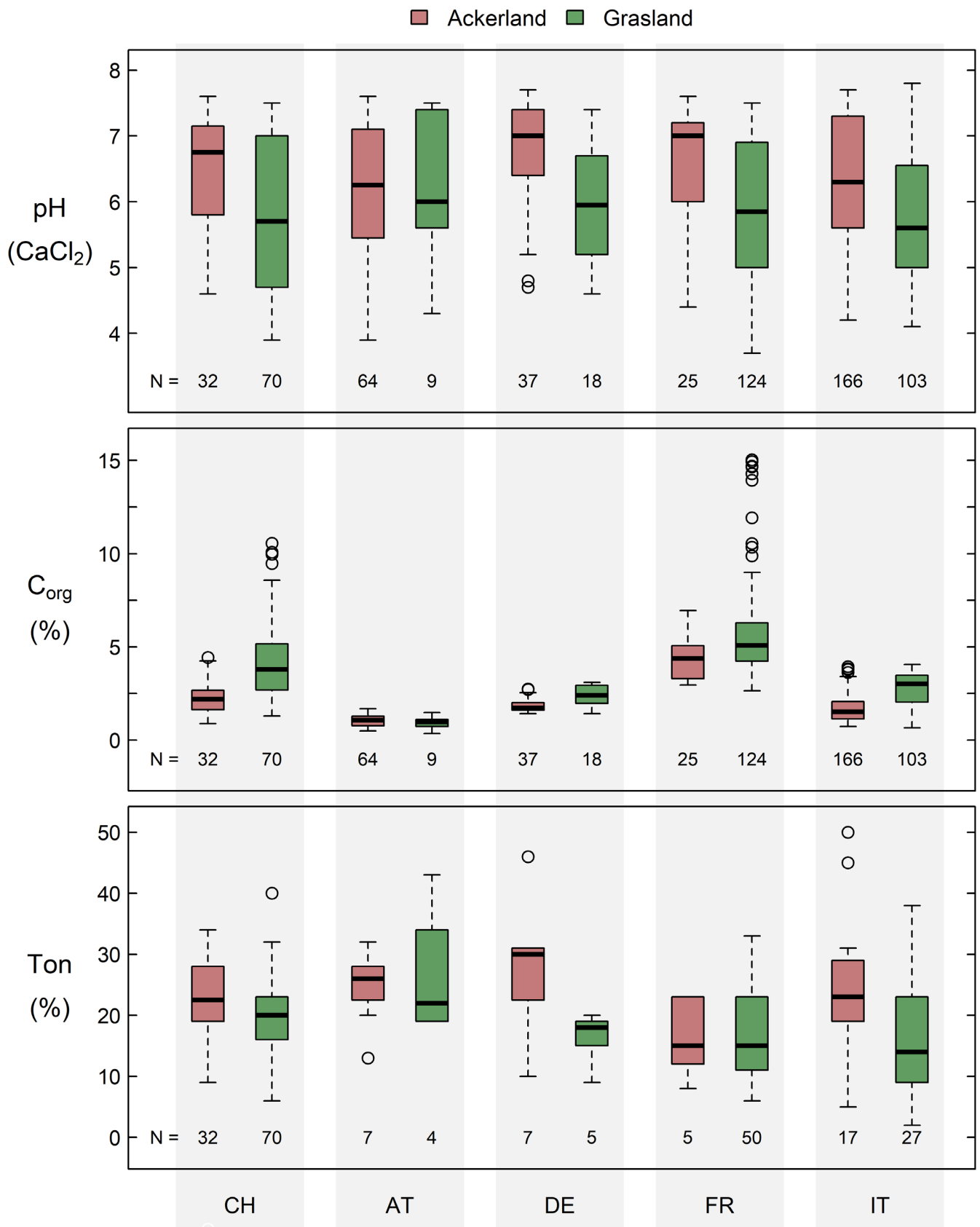


Abbildung 32: Boden-Kennwerte für Acker- und Graslandstandorte, die im Rahmen des LUCAS-Soil-Projektes in der Schweiz und den angrenzenden NUTS2-Regionen beprobt wurden. Gezeigt werden Boxplots für den pH-Wert (in CaCl₂-Lösung), den Gehalt an organischem Kohlenstoff (C_{org}) und den Tongehalt. Die Anzahl Messwerte pro Gruppe (N) sind unterhalb der Box vermerkt. CH (Schweiz), AT (Österreich), DE (Deutschland), FR (Frankreich), IT (Italien).

12.2 Empfehlungen für eine harmonisierte Probenahme

Die NABO hat die einmalige Mitarbeit am LUCAS-Soil-Projekt zusätzlich genutzt, um die Methodik der Probenahme zu vergleichen. So wurden 2015 alle Schweizer Beprobungsstandorte gleichzeitig auf zwei Arten beprobt, einmal mit der offiziellen Methode für die LUCAS-Probenahme mit einem Spaten (LUCAS 2012) und ein zweites Mal mit einem Hohlmeisselbohrer, gemäss dem NABO-Monitoring. Unter anderem sollte dieser Methodenvergleich den Einfluss der Probenahme auf das Messergebnis identifizieren und allfällige systematische Unterschiede veranschaulichen. Tatsächlich wurde daraus ersichtlich, dass bei der LUCAS-Probenahme mit Spaten ein grosser Ermessensspielraum bei der praktizierten Einstichtiefe besteht. Die Folge davon sind Abweichungen bei der Probenahme. Die Parallelbeprobung mit Hohlmeisselbohrer konnte dieses Problem eindeutig bestätigen (Fernández-Ugalde et al. 2020). Basierend auf den bisherigen Erfahrungen wird das Probenahmeprotokoll für die LUCAS-Soil-Kampagne 2022 überarbeitet. Insbesondere soll damit die Kontrolle der einheitlichen und korrekten Einstichtiefe präzisiert werden. Diese methodische Optimierung kann die Vergleichbarkeit der Ergebnisse trotz unterschiedlicher Probenahmeteams verbessern.

Weiterführende Informationen

[Comparison of sampling with spade and gouge auger for topsoil monitoring at the continental scale.](#)

Wissenschaftlicher Artikel, EJSS, Fernández-Ugalde et al. 2020.

[Joint Research Centre > LUCAS](#)

www.nabo.ch > [Ergänzende Untersuchungen](#) > [EU-Projekt «LUCAS-Soil»](#)

13 Bodeninformationssystem NABODAT: NABO macht wertvolle Monitoring-Daten aus mehr als drei Jahrzehnten verfügbar

Die Daten der NABO werden seit letztem Jahr im Bodeninformationssystem NABODAT abgelegt und regelmässig aktualisiert. Diese nationale Datenbank speichert Bodeninformationen aus öffentlichen Quellen und harmonisiert unter anderem die Langzeitdaten aus kantonalen und nationalen Monitoringprogrammen in einem einheitlichen Format. Für die Nutzung und die Inwertsetzung der gesammelten Bodeninformationen steht der Nationale Bodendatensatz frei zur Verfügung.

Wie in den vorangegangenen Kapiteln beschrieben sind detaillierte Bodeninformationen für den Schutz und die nachhaltige Nutzung der Schweizer Böden elementar. Allerdings sind Zustand und Beschaffenheit für weite Teile der Landesfläche unbekannt. Erst 13 % der Landwirtschaftsflächen sind kartiert und mit Bodenkarten in guter Qualität dokumentiert (Rehbein et al. 2019). Bis vor wenigen Jahren fehlte zudem eine schweizweite koordinierte und harmonisierte Ablage der verfügbaren Bodeninformationen.

Seit 2012 ist die Fachapplikation NABODAT in Betrieb. Aufgabe der dazugehörigen Servicestelle ist, die bei den Bundesstellen und den Kantonen verfügbaren Bodeninformationen zu integrieren und die heterogenen Standards früherer Erhebungen und Kartierungen ebenso wie unterschiedliche Datenmodelle zu harmonisieren. Die Datenmigrationen benötigen zwar viel Arbeit, aber der Aufwand zahlt sich aus: Inzwischen konnte ein Grossteil der punktuellen Bodeninformationen der Schweiz in NABODAT standardisiert und aufbereitet werden. Diese Aufbauarbeiten dürfen deshalb als Meilenstein für den Bodenschutz in der Schweiz bezeichnet werden.

Bodendatensatz Schweiz Version 5 (September 2020)

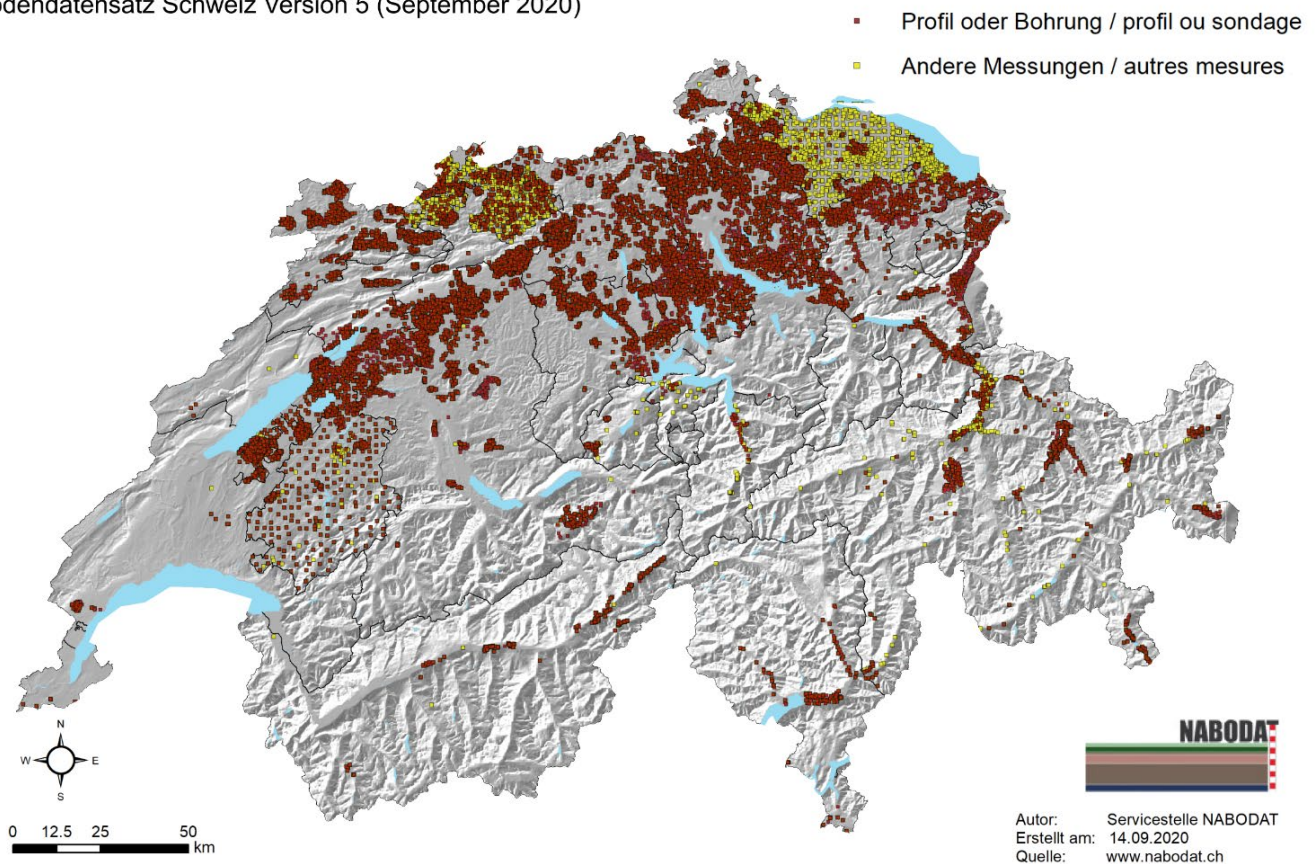


Abbildung 33: Nationaler Bodendatensatz Schweiz, Version 5

Die umfassenden und qualitativ hochstehenden Bodeninformationen der NABO, die aus dem Standardmonitoring und ergänzenden Untersuchungen wie zum Beispiel für LUCAS-Soil (siehe Kapitel 12) stammen, wurden 2020 in NABODAT integriert. Zur Aktualisierung der Daten sind jährliche Updates vorgesehen. Mit der Datenspeicherung in NABODAT erfüllt die Bodenbeobachtung auch die Anforderungen der Geoinformationsverordnung (GeoIV). Diese fordert einen Datentransfer über die plattformunabhängige Sprache INTERLIS, mit der räumliche Daten genau beschrieben und unter Anwendern einfach ausgetauscht werden können (www.interlis.ch).

Die externe Nachfrage an die NABODAT-Servicestelle nach Bodeninformationen nahm in den letzten Jahren stetig zu. Um die Fachwelt auch ausserhalb von Organisationen des Bundes und der Kantone mit standardisierten Bodendaten zu bedienen, bietet die Servicestelle NABODAT zwei harmonisierte Informationsprodukte an, den «[Bodenkartierungskatalog Schweiz](#)» und den «[Nationalen Bodendatensatz Schweiz](#)». Letzterer entspricht aktuell der Version 5 und enthält Bodeninformationen von rund 25'000 Messstandorten aus 23 Kantonen (Abbildung 33). Diese Daten sind von den jeweiligen Datenherren für eine weitere Nutzung freigegeben und stehen der Öffentlichkeit frei zur Verfügung. Über deren Integration in NABODAT fliessen die NABO-Daten ebenfalls automatisch in diese harmonisierten Informationsprodukte ein. Auch sie sind nun gemeinsam mit den Ergebnissen der meisten kantonalen Monitoringprogramme (KABO) einheitlich und koordiniert verfügbar.

Sowohl der «[Bodenkartierungskatalog Schweiz](#)» als auch der «[Nationale Bodendatensatz Schweiz](#)» werden künftig als Produkte des Kompetenzzentrums Boden (www.ccsols.ch) angeboten und über ein Datenportal zur Verfügung gestellt. Dieses Datenportal ist im Aufbau begriffen. Unabhängig von der Bezugsquelle gilt aber: Die harmonisierten Bodeninformationen in NABODAT und der Nationale Bodendatensatz sind wahre Datenschätze, welche den Schutz der Böden in der Schweiz voranbringen werden. Die Produkte von NABODAT tragen dazu bei, dass die unter anderem für das NABO-Monitoring aufwändig erhobenen Daten über den Zustand der Schweizer Böden in Wert gesetzt und vielfältig und zweckdienlich genutzt werden können.

Weiterführende Informationen

[NABODAT: das nationale Bodeninformationssystem \(www.nabodat.ch\)](http://www.nabodat.ch)

[Bodenkartierungskatalog Schweiz](#)

[Nationaler Bodendatensatz Schweiz](#)

[Kompetenzzentrum Boden](#)

14 Dank

Die Ergebnisse in diesem Bericht bauen auf Leistungen auf, die über die letzten mehr als drei Jahrzehnte in der Nationalen Bodenbeobachtung (NABO) erarbeitet wurden. Ein spezieller Dank gilt deshalb allen ehemaligen NABO-Mitarbeitenden, die die Basis für diese Auswertungen gelegt haben, sowie den aktuellen Mitarbeitenden, die diese Daten erhoben und analysiert haben.

Die Breite der Berichterstattung macht deutlich, dass zahlreiche Ergebnisse nur in Zusammenarbeit mit Spezialistinnen und Spezialisten aus anderen Agroscope-Forschungsgruppen entstehen konnten, namentlich aus den Gruppen Umweltanalytik, molekulare Oekologie, Boden-Pflanzen-Interaktionen sowie Klima und Landwirtschaft. Ihnen allen möchten wir an dieser Stelle für die inspirierende Zusammenarbeit herzlich danken.

Ein ganz spezieller Dank geht an die Auftraggeber, das Bundesamt für Landwirtschaft, vertreten durch Agroscope, und das Bundesamt für Umwelt, für das uns entgegengebrachte Vertrauen und die finanzielle Unterstützung dieser Monitoring-Aktivitäten während mehrerer Jahrzehnte.

15 Referenzen

- Agroscope 2016. Fütterungsempfehlungen für Schweine (Gelbes Buch). Agroscope, Posieux. <https://www.agroscope.ch/gelbes-buch> (Konsultationsdatum 1.6.2021)
- Agroscope 2021. Fütterungsempfehlungen für Wiederkäuer (Grünes Buch). Agroscope, Posieux. <http://www.agroscope.ch/gruenes-buch> (Konsultationsdatum 1.6.2021)
- Anderson T.-H. & Domsch K.H. 2010. Soil microbial biomass: The eco-physiological approach. *Soil Biol. Biochem* 42: 2039-2043.
- BAFU 2018. Deposition von Luftschadstoffen in der Schweiz. Moosanalysen 1990 – 2015. Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Zustand Nr. 1818.
- BAFU 2019. Luftqualität 2018. Messresultate des Nationalen Beobachtungsnetzes für Luftfremdstoffe (NABEL). Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Zustand Nr. 1916.
- Baumann P., Helfenstein A., Gubler A., Keller A., Meuli R.G., Wächter D., Lee J., Viscarra Rossel R., Six J. 2021. Developing the Swiss soil spectral library for local estimation and monitoring. *Soil* 2020-105. <https://doi.org/10.5194/soil-2020-105>
- BBodSchV 1999. Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Berlin.
- Biodiversitäts-Monitoring der Schweiz BDM 2014a. Basisdaten aus dem Biodiversitäts-Monitoring Schweiz E6. (Stand 23.02.2021) https://www.biodiversitymonitoring.ch/images/dokumente/daten/basisdaten_dt/1360_E6_Basisdaten_2015_V1.pdf
- Biodiversitäts-Monitoring der Schweiz BDM 2014b. Basisdaten aus dem Biodiversitäts-Monitoring Schweiz. Z9 (Stand 23.02.2021) https://www.biodiversitymonitoring.ch/images/dokumente/daten/basisdaten_dt/1260_Z9_Basisdaten_2014_v1.pdf
- BLW 2015. Marktkampagne Dünger 2011/2012. Kennzeichnung und Schwermetalle. Bundesamt für Landwirtschaft (BLW), Bern.
- BLW 2020. Verkaufsmengen der Pflanzenschutzmittel-Wirkstoffe. Stand 28.10.2020. Bundesamt für Landwirtschaft (BLW), Bern. <https://www.blw.admin.ch/blw/de/home/nachhaltige-produktion/pflanzenschutz/pflanzenschutzmittel/verkaufsmengen-der-pflanzenschutzmittel-wirkstoffe.html> (abgerufen 01.06.2021)
- Chiaia-Hernandez A.C., Scheringer M., Müller A., Stieger G., Wächter D., Keller A., Pintado-Herrera M.G., Lara-Martin P.A., Bucheli T.D., Hollender J. 2020. Target and suspect screening analysis reveals persistent emerging organic conaminants in soils and sediments. *Sci of the Total Env* 740: 140181. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140181>
- Chiaia-Hernandez A.C., Keller A., Wächter D., Steinlin C., Camenzuli L., Hollender J., Krauss M. 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. <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b02529>
- Curchod L., Oltramare C., Junghans M., Stamm C., Dalvie M.A., Rössli M., Fuhrmann S. 2020. Temporal variation of pesticide mixtures in rivers of three agricultural watersheds during a major drought in the Western Cape, South Africa. *Water Res X* 6:12. <https://doi.org/10.1016/j.wroa.2019.100039>
- Decombes P., Walthert L., Baltensweiler A., Meuli R.G., Karger D.N., Ginzler Ch., Zurell D., Zimmermann N.E. 2020. Spatial modelling of ecological indicator values improves prediction of plant distributions in complex landscapes. *Ecography*. 43:1-16. <https://doi.org/10.1111/ecog.05117>
- EJP Soil.2021. <https://ejpsoil.eu/>
- FAL, FAW, RAC. 1998. Schweizerische Referenzmethoden der Eidgenössischen landwirtschaftlichen Forschungsanstalten, Band 2, Bodenuntersuchung zur Standortcharakterisierung.

- Fernandez-Alvarez M, Lamas J.P., Garcia-Chao M., Garcia-Jares C., Llompart M., Lores M., Dagnac T. 2010. Monitoring of pesticide residues in dairy cattle farms from NW Spain. *Journal of Environmental Monitoring* 12 (10):1864-1875. <https://doi.org/10.1039/c0em00054j>
- Fernández-Ugalde O., Jones A., Meuli R.G. 2020. Comparison of sampling with spade and gouge auger for topsoil monitoring at the continental scale. *European Journal of Soil Science*, 71:137-150. <https://doi.org/10.1111/ejss.12862>
- Fliessbach A., Oberholzer H., Gunst L., Mäder P. 2007. Soil organic matter and biological soil quality indicators after 21 years of organic and conventional farming. *Agric. Ecosyst. Environ.* 118, 273–284.
- Gross T., Keller A., Müller M., Gubler A. 2021a. Stoffbilanzen für Parzellen der Nationalen Bodenbeobachtung. Nährstoffe und Schwermetalle 1985-2017. *Agroscope Science* 123. <https://doi.org/10.34776/as123g>
- Gross T., Müller M., Keller A., Gubler A. 2021b. Erfassung der Bewirtschaftungsdaten im Messnetz der Nationalen Bodenbeobachtung NABO. *Agroscope Science* Nr. 122. <https://doi.org/10.34776/as122g>
- Gschwend F., Hartmann M., Hug A.-S., Enkerli J., Gubler A., Frey B., Meuli R.G., Widmer F. 2021. Long-term stability of soil bacterial and fungal community structures revealed in their abundant and rare fractions. *Molecular Ecology*. <https://doi.org/10.1111/mec.16036>
- Gubler A., Meuli R., Keller A. 2020. Bedürfnisse der Kantone und des Bundes rund um ein Monitoring der Resource Boden. Nationale Bodenbeobachtung, im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU). <http://link.ira.agroscope.ch/de-CH/publication/44279>
- 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. <https://ira.agroscope.ch/de-CH/publication/34920>
- Gubler A., Wächter D., Schwab P., Müller M., Keller A. 2019. Twenty-five years of observations of soil organic carbon in Swiss croplands showing stability overall but with some divergent trends. *Environmental Monitoring and Assessment*, 191 (277), 117. <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7435-y>
- Guzzella L.M., Novati S., Casatta N., Roscioli C., Valsecchi L., Binelli A., Parolini M., Solca N., Bettinetti R., Manca M., Mazzoni M., Piscia R., Volta P., Marchetto A., Lami A., Marziali L. 2018. Spatial and temporal trends of target organic and inorganic micropollutants in Lake Maggiore and Lake Lugano (Italian-Swiss water bodies): contamination in sediments and biota. *Hydrobiologia* 824 (1):271-290. <https://doi.org/10.1007/s10750-017-3494-7>
- Hug A.S., Gubler A., Gschwend F., Widmer F., Oberholzer H., Frey B., Meuli R.G. 2018. NABObio – Bodenbiologie in der Nationalen Bodenbeobachtung, Ergebnisse 2012–2016, Handlungsempfehlungen und Indikatoren. *Agroscope Science* 63. <http://link.ira.agroscope.ch/de-CH/publication/38019>
- Hug A.S., Moll J., Gubler A. 2021. Monitoring Bodenbiologie. Auswertung bodenmikrobiologischer Daten von kantonalen und nationalen Bodenbeobachtungsstandorten. *Agroscope Science* 110. <https://doi.org/10.34776/as110g>
- Humann-Guilleminot S, Binkowski Ł.J., Jenni L., Hilke G., Glauser G., Helfenstein F. 2019. A nation-wide survey of neonicotinoid insecticides in agricultural land with implications for agri-environment schemes. *J Appl Ecol.* 2019; 56: 1502–1514. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.13392>
- Johannes A., Matter A., Schulin R., Weisskopf P., Paveye Ph.C., Boivin P. 2017. Optimal organic carbon values for soil structure quality of arable soils. Does clay content matter? *Geoderma* 302: 14-21. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.04.021>
- JRC-ESDAC. 2021. <https://esdac.jrc.ec.europa.eu/projects/lucas>
- Kanton Bern 2021. Nationale Marktkampagne Dünger 2019/2020. Schlussbericht. Wirtschafts-, Energie- und Umweltdirektion (WEU), Kantonales Laboratorium Bern, Bern.
- Keller A., Rossier N., Desaulles A. 2005. Schwermetallbilanzen von Landwirtschaftsparzellen der nationalen Bodenbeobachtung. Schriftenreihe der FAL 54, Agroscope, FAL Reckenholz, Zürich. <http://link.ira.agroscope.ch/de-CH/publication/35845>

- Kosubová P., Škulcová L., Poláková Š., Hofman J., Bielská L. 2020. Spatial and temporal distribution of the currently-used and recently-banned pesticides in arable soils of the Czech Republic. *Chemosphere*, Volume 254, 126902, <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126902>
- LUCAS 2012. LUCAS Soil Sampling Instructions. European Commission, Joint Research Center, Ispra.
- Mayerhofer J., Wächter D., Calanca P., Kohli L., Roth T., Meuli R.G., Widmer F. 2021. Environmental and anthropogenic factors shape major bacterial community types across the complex mountain landscape of Switzerland. *Frontiers in Microbiology*, March 2021, Vol. 12. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.581430>
- Menzi H. & Kessler J. 1998. Heavy metal content of manures in Switzerland. *Proc Eighth Int Conf FAO Netw Recycl Agric Munic Ind Residues Agric* 495–506.
- Menzi H., Lehmann E., Kessler J. 1999. Anfall und Zusammensetzung von Hofdünger aus der Rindviehmast. *Agarforschung* 6 (11+12), 417-420.
- Meuli R.G., Schwab P., Wächter D., Ammann S. 2014. Nationale Bodenbeobachtung (NABO) 1985-2004: Zustand und Veränderungen der anorganischen Schadstoffe und Bodenbegleitparameter. *Nationale Bodenbeobachtung (NABO)*, Hrsg. Bundesamt für Umwelt (BAFU), Bern. Umwelt-Wissen Nr. 1409. <http://link.ira.agroscope.ch/de-CH/publication/34087>
- Meuli R.G., Wächter D., Schwab P., Kohli L., Zimmermann R. 2017. Connecting biodiversity monitoring with soil inventory data – A Swiss case study. *Bulletin BGS* 38, 65-69.
- 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.
- Oberholzer H.-R. & Scheid S. 2007. Bodenmikrobiologische Kennwerte. Erfassung des Zustands landwirtschaftlicher Böden im NABO-Referenzmessnetz anhand biologischer Parameter (NABObio). Bundesamt für Umwelt (BAFU), Bern, Umwelt-Wissen Nr. 0723.
- Rehbein K., Sprecher Ch., Keller A. 2019. Übersicht Stand Bodenkartierung in der Schweiz - Ergänzung des Bodenkartierungskataloges Schweiz um Bodeninformationen aus Meliorationsprojekten, Agroscope, Servicestelle NABODAT, Zürich. <https://www.are.admin.ch/dam/are/de/dokumente/raumplanung/dokumente/bericht/ubersicht-stand-bodenkartierung.pdf.download.pdf/ubersicht-stand-bodenkartierung.pdf>
- Riedo J., Wettstein F.E., Rösch A., Herzog Ch., Banerjee S., Büchi L., Charles R., Wächter D., Martin-Laurent F., Bucheli T.D., Walder F., van der Heijden M.G.A. 2021. Widespread Occurrence of Pesticides in Organically Managed Agricultural Soils—the Ghost of a Conventional Agricultural Past? *Environmental Science & Technology* 2021 55 (5), 2919-2928. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c06405>
- Rösch A., Beck B., Hollender J., Stamm C., Singer H., Doppler T., Junghans M. 2019. Geringe Konzentrationen mit grosser Wirkung. Nachweis von Pyrethroid- und Organophosphatinsektiziden in Schweizer Bächen im pg I-1-Bereich. *Aqua & Gas* 99 (11):54-66.
- Sánchez-González S., Pose-Juan E., Herrero-Hernández E., Álvarez-Martín A., Sánchez-Martín M.J., Rodríguez-Cruz S. 2013. Pesticide residues in groundwaters and soils of agricultural areas in the Águeda River Basin from Spain and Portugal, *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 93:15, 1585-1601. <https://doi.org/10.1080/03067319.2013.814122>
- Schläpfer K., Farronato N., Zoller N., Tiefenbacher A., Winter F., Mazacek J., Ruppe S., Kutlar Joss M., Kappeler R., Roth Z., Fuhrmann S., Probst-Hensch N. 2021. Pilot-Messungen von Pflanzenschutzmitteln in Luft und Regen in der Schweiz. Bundesamt für Umwelt (BAFU), Oekotoxzentrum, Lufthygieneamt beider Basel und OSTLUFT
- Schultheiss U., Roth U., Döhler H., Eckel H. 2004. Erfassung von Schwermetallströmen in landwirtschaftlichen Tierproduktionsbetrieben und Erarbeitung einer Konzeption zur Verringerung der Schwermetalleinträge durch Wirtschaftsdünger tierischer Herkunft in Agrarökosysteme. Umweltbundesamt, Berlin.
- Schwab P. 2010. Eindringwiderstandsmessung mit dem Penetrometer – Referenzierung von Zeitreihen für die Boden-Dauerbeobachtung. *Bulletin BGS*, 30, 2010, 139-142. <http://link.ira.agroscope.ch/de-CH/publication/35680>

- Schwab P., Dietrich M., Gubler A. 2018. Messung des Eindringwiderstands und des Bodenwasserzustandes. Methodenvergleich verschiedener Geräte und Verfahren. Hrsg. NABO, Zürich-Reckenholz. <http://link.ira.agroscope.ch/de-CH/publication/38452>
- Schwab P. & Gubler A. 2015 (aktualisiert Mai 2016). NABO-Standortkonzept: Betrieb des Messnetzes ab 2015. Hrsg. Agroscope - Nationale Bodenbeobachtung NABO, Reckenholz. <http://link.ira.agroscope.ch/de-CH/publication/46421>
- Schwab P. & Gubler A. 2016. Methoden zur Bestimmung physikalischer Begleitparameter an Bodenproben. Agroscope Science, 40. <http://link.ira.agroscope.ch/de-CH/publication/36112>
- Schwab P. & Gubler A. 2019. Herleitung von Schätzwerten für Lagerungsdichte und Raumgewicht Feinerde: Pedotransferfunktionen für landwirtschaftlich genutzte Böden der Tiefe 0-20 cm. Nationale Bodenbeobachtung (NABO), Zürich-Reckenholz. <http://link.ira.agroscope.ch/de-CH/publication/42150>
- Schwab P., Weisskopf P, Berli M, Rehbein K., Brunner H., Scheid S., Sommer M., Ropka B. 2006. Langzeitbeobachtung von physikalischen und biologischen Bodeneigenschaften Pilotprojekt LAZBO. Teil 2 Boden-physikalische Untersuchungen. Agroscope FAL Reckenholz, Zürich. <http://link.ira.agroscope.ch/de-CH/publication/25555>
- Silva V., Mol H.G., Zomer P., Tienstra M., Ritsema C.J., Geissen, V. 2019. Pesticide residues in European agricultural soils—a hidden reality unfolded. *Sci. Total Environ.* 2019, 653, 1532–1545.
- Spycher S., Mangold S., Doppler T., Junghans M., Wittmer I., Stamm C., Singer H. 2018. Pesticide Risks in Small Streams—How to Get as Close as Possible to the Stress Imposed on Aquatic Organisms. *Environmental Science & Technology* 52 (8):4526-4535. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b00077>
- Stumpf F., Schneider M.K., Keller A., Mayr A., Rentschler T., Meuli R.G., Schaepmann M., Liebisch F. 2020. Spatial monitoring of grassland management using multi-temporal satellite imagery. *Ecological Indicators*. 113. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106201>.
- Vasickova J., Hvezdova M., Kosubova P., Hofman J. 2019. Ecological risk assessment of pesticide residues in arable soils of the Czech Republic. *Chemosphere* 216:479-487. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.10.158>
- VBBö 1998. Verordnung über Belastungen des Bodens (VBBö). SR 814.12.
- VBB/BSA 2009. Arbeitshilfe zur Anwendung und Interpretation bodenbiologischer Parameter. Arbeitsgruppe Vollzug Bodenbiologie VBB/BSA, Frick.

16 Anhang

16.1 Neue Standorte im NABO-Messnetz

Tabelle A 1 Übersicht über die neuen Standorte im NABO-Messnetz ab der 7. Erhebung (2015 – 2019).

Standort-nummer	Standort-name	Gemeinde	Kanton	Höhe (m ü. M.)	Landnutzung	Standort-typ	Erst-beprobung
107	Oberwald	Obergoms	VS	1'366	Grasland	Hauptstandort	2015
108	Bedretto	Bedretto	TI	1'840	Grasland	Hauptstandort	2015
109	Engstligenalp	Adelboden	BE	1'995	Grasland	Hauptstandort	2016
110	Poschiamo	Poschiamo	GR	967	Grasland	Hauptstandort	2016
110.1	Poschiamo	Poschiamo	GR	1'940	Grasland	Höhenstufe	2016
111	Sarnen	Sarnen	OW	995	Grasland	Hauptstandort	2016
111.1	Sarnen	Sarnen	OW	725	Grasland	Höhenstufe	2016
111.2	Sarnen	Sarnen	OW	1'500	Grasland	Höhenstufe	2016
112	Sevelen	Sevelen	SG	1'150	Grasland	Hauptstandort	2016
112.1	Sevelen	Sevelen	SG	520	Grasland	Höhenstufe	2016
112.2	Sevelen	Sevelen	SG	1'800	Grasland	Höhenstufe	2016
113	Sent	Sent	GR	1'720	Grasland	Hauptstandort	2017
113.1	Sent	Sent	GR	1'300	Grasland	Höhenstufe	2017
113.2	Sent	Sent	GR	2'300	Grasland	Höhenstufe	2017

16.2 Was sind «zentrierte Daten»?

Betrachtet man Messwerte über mehrere Zeitpunkte, ist es oft schwierig, Muster für die zeitliche Entwicklung zu erkennen, denn: Die Veränderungen zwischen den Jahren sind meist relativ klein im Vergleich zu den Unterschieden zwischen den Standorten. In solchen Fällen empfiehlt es sich, die Werte der einzelnen Standorte zu zentrieren. Dies bedeutet: Für jeden Standort und jeden Parameter wird der Median (oder alternativ der Mittelwert) über alle Erhebungen berechnet. Der Median (oder der Mittelwert) wird anschliessend von den Original-Messwerten subtrahiert (siehe schematische Darstellung in Abbildung A 1).

Nach dem Zentrieren kann die absolute Höhe der Messwerte nicht mehr beurteilt werden. Es lässt sich beispielsweise nicht mehr erkennen, welcher Standort eine höhere Biomasse, mehr Kohlenstoff, etc. enthält. Dafür sind die Unterschiede der einzelnen Erhebungen deutlicher erkennbar. Weiter lässt sich beurteilen, ob verschiedene Standorte oder Parameter ähnliche oder unterschiedliche Verläufe zeigen. Auch Anomalien in einzelnen Messreihen lassen sich besser erkennen, beispielsweise der letzte Wert der blauen Messreihe im Schema.

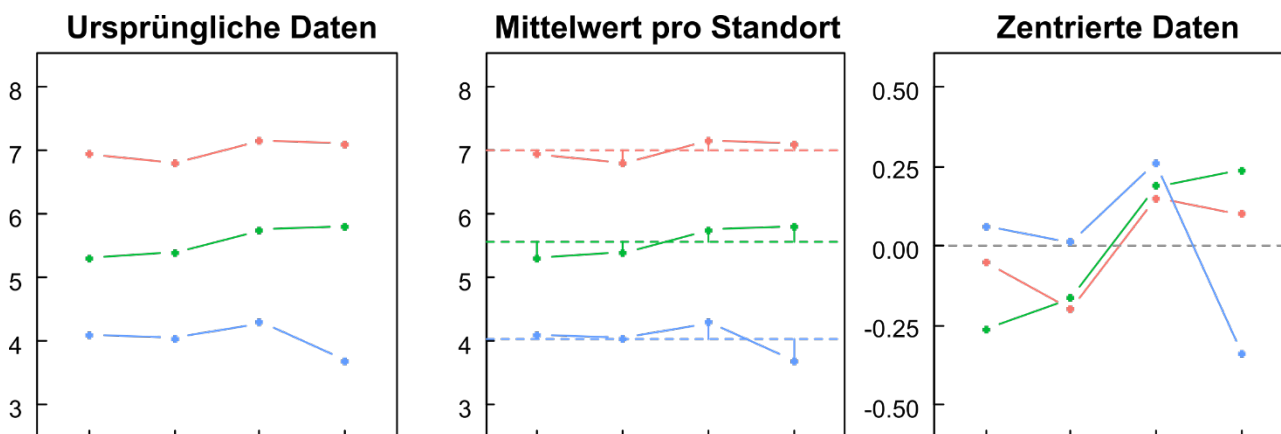


Abbildung A 1 Schematisches Beispiel für die Zentrierung von Datenreihen.

Eine weitere Option ist, zuerst den Logarithmus der ursprünglichen Messwerte zu berechnen und anschliessend die log-transformierten Daten zu zentrieren. So erhält man die proportionale oder relative Abweichung der Original-Daten vom Median oder Mittelwert. Unterschiedliche Parameter sind dann meist besser vergleichbar.

16.3 Tabellen zum Ländervergleich des LUCAS-Soil-Datensatzes

Die folgenden Daten sind im Kapitel 12 diskutiert und graphisch dargestellt.

Tabelle A 2 Übersicht der NUTS-2-Regionen, die für den Vergleich mit der Schweiz herangezogen wurden.

Land	NUTS-2-Region		Anz. Standorte	Standorte total pro Land
	Nummer	Bezeichnung		
Deutschland	DE13	Freiburg	36	71
	DE14	Tübingen	35	
Frankreich	FR42 / FRF1	Alsace	42	334
	FR43 / FRC2	Franche-Comté	95	
	FR71 / FRK2	Rhône-Alpes	199	
Italien	ITC1	Piemont	172	360
	ITC2	Valle d'Aosta	16	
	ITC4	Lombardia	121	
	ITH1	Provincia Autonoma di Bolzano	51	
Österreich	AT33	Tirol	65	82
	AT34	Vorarlberg	17	
Schweiz			155	155

Tabelle A 3 Übersicht über die Bodenkennwerte für LUCAS-Soil-Ackerstandorte in der Schweiz und den angrenzenden NUTS2-Regionen in Deutschland, Frankreich, Italien und Österreich.

		Ton	Silt	Sand	C _{org}	CaCO ₃	N _{tot}	P _{tot}	EC	pH _{H2O}	pH _{CaCl2}
Schweiz	N	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32
	Min.	9.0	34.0	11.0	8.9	0.0	1.0	16.3	12.3	5.0	4.6
	Max	34.0	70.0	49.0	44.4	190.0	4.0	108.7	52.1	8.1	7.6
	Median	22.5	48.0	26.5	22.0	1.0	2.0	42.7	24.6	7.1	6.8
	Mittelwert	23.3	49.3	27.2	22.5	19.2	2.5	47.8	26.5	6.8	6.4
	Std. Dev.	6.2	7.7	10.3	8.7	43.2	0.8	23.7	10.7	1.0	1.0
Deutschland	N	7	7	7	37	37	37	37	37	37	37
	Min.	10.0	40.0	2.0	14.2	0.0	1.4	8.3	9.7	5.1	4.7
	Max	46.0	59.0	51.0	27.5	195.0	3.3	125.7	76.3	8.2	7.7
	Median	30.0	47.0	24.0	17.3	10.0	2.1	36.3	21.1	7.3	7.0
	Mittelwert	27.6	48.6	23.9	18.6	48.5	2.2	44.5	27.1	7.1	6.8
	Std. Dev.	11.2	7.3	15.9	4.0	66.4	0.5	28.2	14.9	0.8	0.8
Frankreich	N	5	5	5	25	25	25	25	25	25	25
	Min.	8.0	38.0	28.0	29.5	0.0	1.8	7.7	22.3	4.5	4.4
	Max	23.0	53.0	46.0	69.6	484.0	6.5	179.0	142.1	8.1	7.6
	Median	15.0	47.0	40.0	43.7	38.0	3.7	73.9	32.9	7.2	7.0
	Mittelwert	16.2	45.2	38.8	44.5	76.3	3.9	69.0	45.9	6.8	6.6
	Std. Dev.	6.7	6.9	7.5	10.9	107.0	1.4	40.0	29.1	1.0	1.0
Italien	N	17	17	17	166	166	166	166	166	166	166
	Min.	5.0	33.0	2.0	7.3	0.0	0.9	4.8	6.0	4.6	4.2
	Max	50.0	62.0	61.0	39.4	700.0	4.7	164.8	70.3	8.1	7.7
	Median	23.0	47.0	25.0	15.3	1.0	1.9	32.1	21.6	6.6	6.3
	Mittelwert	24.9	49.4	25.3	16.9	43.9	2.1	40.1	25.4	6.7	6.4
	Std. Dev.	10.8	7.4	14.5	6.9	92.7	0.7	29.1	13.4	0.9	0.9
Österreich	N	7	7	7	64	64	64	64	64	64	64
	Min.	13.0	18.0	11.0	4.9	0.0	0.7	4.9	5.5	4.2	3.9
	Max	32.0	58.0	69.0	16.9	246.0	2.5	101.0	52.2	8.1	7.6
	Median	26.0	53.0	21.0	10.7	0.5	1.4	32.6	18.1	6.6	6.3
	Mittelwert	24.6	49.1	26.1	10.7	30.6	1.4	35.4	19.6	6.6	6.2
	Std. Dev.	6.3	14.2	20.0	3.3	61.4	0.4	22.7	10.0	1.0	1.0

Tabelle A 4 Übersicht über die Bodenkennwerte für LUCAS-Soil-Graslandstandorte in der Schweiz und den angrenzenden NUTS2-Regionen in Deutschland, Frankreich, Italien und Österreich.

		Ton	Silt	Sand	C _{org}	CaCO ₃	N _{tot}	P _{tot}	EC	pH _{H2O}	pH _{CaCl2}
Schweiz	N	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70
	Min.	6.0	35.0	6.0	13.0	0.0	2.0	0.0	4.8	4.2	3.9
	Max	40.0	73.0	52.0	105.6	410.0	9.0	167.8	90.0	7.7	7.5
	Median	20.0	54.0	23.0	37.9	0.0	4.0	23.8	38.7	6.1	5.7
	Mittelwert	19.6	54.4	26.0	42.7	35.7	4.6	32.0	41.3	6.1	5.8
	Std. Dev.	6.5	7.7	11.8	21.0	80.0	1.7	27.4	19.8	1.1	1.2
Deutschland	N	5	5	5	18	18	18	18	18	18	18
	Min.	9.0	39.0	18.0	14.2	0.0	1.6	8.7	6.7	4.8	4.6
	Max	20.0	62.0	52.0	31.0	184.0	3.8	103.6	77.9	7.8	7.4
	Median	18.0	50.0	36.0	24.1	1.0	2.8	20.0	30.5	6.1	6.0
	Mittelwert	16.2	50.4	33.6	23.7	27.1	2.7	35.7	31.8	6.3	6.0
	Std. Dev.	5	5	5	5.5	60.5	0.7	29.1	20.9	0.9	0.9
Frankreich	N	50	50	50	124	124	124	124	124	124	124
	Min.	6.0	32.0	11.0	26.4	0.0	2.4	6.2	6.4	3.9	3.7
	Max	33.0	67.0	62.0	150.4	531.0	12.8	129.7	184.9	7.7	7.5
	Median	15.0	55.0	28.5	50.9	1.0	5.3	26.2	45.0	6.1	5.9
	Mittelwert	16.3	54.0	29.7	57.7	35.2	5.6	33.4	49.7	6.1	5.8
	Std. Dev.	7.1	8.2	13.4	26.0	88.1	2.0	25.4	35.9	1.0	1.0
Italien	N	27	27	27	103	103	103	103	103	103	103
	Min.	2.0	13.0	9.0	6.6	0.0	0.8	0.0	6.6	4.3	4.1
	Max	38.0	64.0	85.0	40.6	411.0	5.3	174.9	81.8	8.3	7.8
	Median	14.0	51.0	33.0	30.1	0.0	3.2	21.5	22.4	6.0	5.6
	Mittelwert	16.2	48.7	35.1	27.4	23.2	3.1	31.9	27.4	6.1	5.8
	Std. Dev.	8.9	11.5	18.5	9.2	68.4	1.1	28.8	17.7	1.0	1.0
Österreich	N	4	4	4	9	9	9	9	9	9	9
	Min.	19.0	49.0	9.0	3.5	0.0	0.5	4.7	4.6	4.6	4.3
	Max	43.0	63.0	32.0	14.7	331.0	1.7	112.1	24.5	8.1	7.5
	Median	22.0	53.0	19.0	9.7	1.0	1.2	34.1	13.8	6.4	6.0
	Mittelwert	26.5	54.5	19.8	9.6	62.9	1.2	37.1	14.1	6.8	6.3
	Std. Dev.	11.4	6.8	10.6	3.6	107.6	0.4	32.4	6.7	1.2	1.2