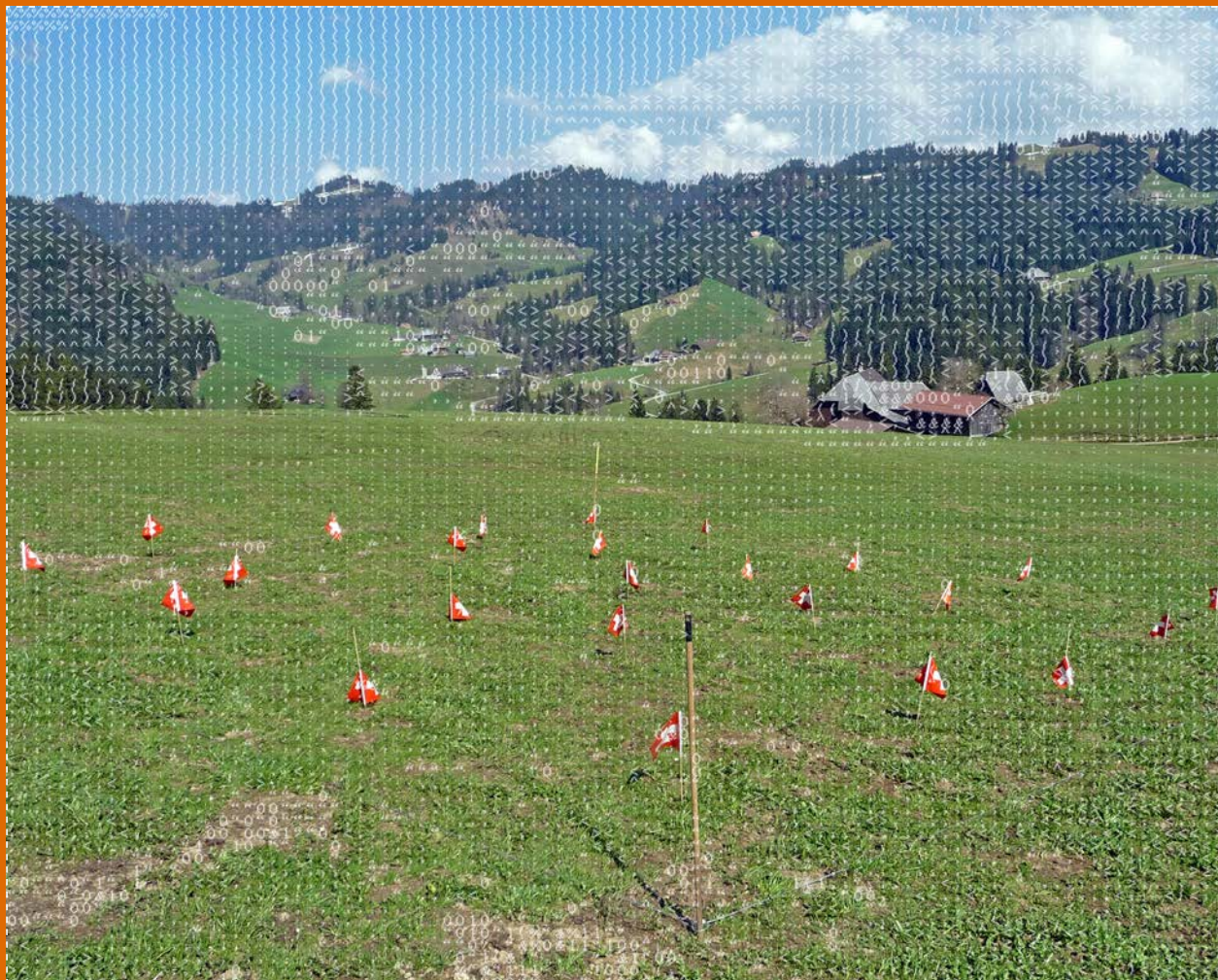


# > Nationale Bodenbeobachtung (NABO) 1985–2009

*Zustand und Veränderungen der anorganischen Schadstoffe  
und Bodenbegleitparameter*



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Bundesamt für Umwelt BAFU



# > Nationale Bodenbeobachtung (NABO) 1985–2009

*Zustand und Veränderungen der anorganischen Schadstoffe  
und Bodenbegleitparameter*

## **Impressum**

### **Herausgeber**

Bundesamt für Umwelt (BAFU)

Das BAFU ist ein Amt des Eidg. Departements für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK).

### **Autoren**

Andreas Gubler, Peter Schwab, Daniel Wächter, Reto G. Meuli, Armin Keller

### **Begleitung BAFU**

Toni Candinas (BLW), Andrea Ulrich (BLW), Fabio Wegmann (BAFU)

### **Zitierung**

Gubler A., Schwab P., Wächter D., Meuli R. G., Keller A. 2015: Ergebnisse der Nationalen Bodenbeobachtung (NABO) 1985-2009. Zustand und Veränderungen der anorganischen Schadstoffe und Bodenbegleitparameter. Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Zustand Nr. 1507: 81 S.

### **Gestaltung**

Stefanie Studer, Künten

### **Titelbild**

Bodenprobenahme auf einem Graslandstandort von 10 m x 10 m in der Nähe von Trub BE

### **PDF-Download**

[www.bafu.admin.ch/uz-1507-d](http://www.bafu.admin.ch/uz-1507-d)

Eine gedruckte Fassung kann nicht bestellt werden.

Diese Publikation ist auch in französischer Sprache verfügbar.

© BAFU 2015

# > Inhalt

<b>Abstracts</b>	<b>5</b>
<b>Vorwort</b>	<b>7</b>
<b>Zusammenfassung</b>	<b>8</b>

<b>1 Der Boden – eine knappe Ressource</b>	<b>10</b>
--	-----------

<b>2 Das NABO-Messnetz</b>	<b>13</b>
2.1 103 Standorte	13
2.2 Beprobung und Analytik	15
2.3 Indirektes Monitoring als wichtige Ergänzung	16

<b>3 Schwermetalle</b>	<b>17</b>
3.1 Veränderungen der Schwermetallgehalte im Oberboden	17
3.2 Zink- und Kupfereinträge via Hofdünger	23
3.3 Zinkbilanz einer NABO-Parzelle	29
3.4 Abnehmende Schwermetalleinträge aus der Luft	31

<b>4 Organischer Kohlenstoff</b>	<b>34</b>
4.1 Grasland	34
4.2 Ackerbau	36
4.3 Wald	37
4.4 Standardisierung der Zeitreihen	38

<b>5 Nährstoffe</b>	<b>40</b>
5.1 Grasland	41
5.2 Ackerbau	41
5.3 Handlungsempfehlungen ableiten	42

<b>6 Rasterbeprobung an Standorten des Biodiversitätsmonitorings Schweiz</b>	<b>45</b>
--	-----------

<b>7 Folgerungen</b>	<b>47</b>
7.1 Erfolgskontrolle umweltpolitischer Massnahmen	47
7.2 Handlungsbedarf bei Zink und Kupfer	47
7.3 Veränderungen beim organischen Kohlenstoff	49
7.4 Nährstoffeinträge auf hohem Niveau stabilisiert	49

<b>8 Ausblick</b>	<b>51</b>
8.1 Anpassung des Messnetzes und des Messprogramms	51
8.2 Synthese direktes/indirektes Monitoring	52
8.3 Regionale bis landesweite Zustände	53

<b>Anhang</b>	<b>54</b>
A1 Details zu den Methoden	54
A2 Details zu den Schwermetallen	62

<b>Dank</b>	<b>76</b>
<b>Literatur</b>	<b>77</b>
<b>Verzeichnisse</b>	<b>79</b>



## > Abstracts

The Swiss National Soil Monitoring Network (NABO), with 103 permanent monitoring stations, material flow analyses and process modelling, is both a reference network and an instrument for early detection and for evaluating the effectiveness of soil protection measures. This report presents the results of all five surveys performed so far (1985-2009). The focus rests on the temporal evolutions of soil pollution by heavy metals, on the soil contents of organic carbon, and on the nutrients nitrogen, phosphorus and potassium.

Die Nationale Bodenbeobachtung (NABO) mit ihren 103 Dauerbeobachtungsstandorten, Stoffflussanalysen und Prozessmodellierungen ist ein Referenznetz sowie ein Instrument der Früherkennung und Erfolgskontrolle zum Schutz des Bodens. Im vorliegenden Bericht werden die Resultate aller fünf bisherigen Erhebungen (1985–2009) vorgestellt. Im Zentrum stehen zeitliche Veränderungen bei der Bodenbelastung mit Schwermetallen sowie bei den Gehalten an organischem Kohlenstoff und bei den Nährstoffen Stickstoff, Phosphor und Kalium.

Avec ses 103 sites d'observation à long terme, ses analyses de flux de substances et ses modélisations de processus, l'Observatoire national des sols (NABO) est à la fois un réseau de référence et un instrument d'identification précoce et de contrôles de suivi pour la protection des sols. Ce rapport présente les résultats des cinq périodes de mesures réalisées jusqu'ici (1985–2009). L'accent est mis sur les évolutions temporelles de la pollution aux métaux lourds, des teneurs en carbone organique et des éléments nutritifs azote, phosphore et potassium.

Con 103 siti di osservazione permanente, l'analisi dei flussi di sostanze e la modellizzazione dei processi, la Rete nazionale di osservazione dei suoli (NABO) è una rete di riferimento, ma anche uno strumento di allerta precoce e di valutazione dell'efficacia delle misure di protezione del suolo. Questo rapporto illustra i risultati dei cinque rilevamenti effettuati tra il 1985 e il 2009. Significative appaiono soprattutto le variazioni temporali dell'inquinamento da metalli pesanti, come pure dei tenori di carbonio organico e di nutrienti quali l'azoto, il fosforo e il potassio.

**Keywords:**

Long term soil monitoring,  
Temporal trends,  
Inorganic contaminants,  
Soil organic carbon,  
Nutrients

**Stichwörter:**

Boden-Dauerbeobachtung,  
Zeitliche Entwicklung,  
Anorganische Schadstoffe,  
Organischer Kohlenstoff des  
Bodens, Nährstoffe

**Mots-clés:**

Observation à long terme des  
sols, Développement temporel,  
Polluants inorganiques,  
Carbone organique du sol,  
Éléments nutritifs

**Parole chiave:**

Monitoraggio a lungo termine  
dei suoli, Variazioni temporali,  
Inquinanti inorganici,  
Carbonio organico dei suoli,  
Nutrienti





---

## > Vorwort

Unsere Böden sind wenige Zentimeter bis maximal einige Meter mächtig. Im Vergleich zu den mehr als 6370 km des Erdradius ist dies verschwindend klein – ganz im Gegensatz zu seiner Bedeutung für alles Leben auf dem Land. Die Geschichte der Menschheit während der letzten 10 000 Jahre hat die Böden stark geprägt, wie auch die Böden die Entwicklung der Menschen prägte und prägen wird, denn wir alle sind auch in Zukunft auf genügend und fruchtbare Böden angewiesen. Daher ist es unsere Pflicht, den Böden Sorge zu tragen und Beeinträchtigungen wenn immer möglich zu vermeiden. Die Bodenbildung ist ein langsamer Prozess, in 100 Jahren wird rund 1 cm Boden gebildet. Ebenso erholen sich degradierte Böden nur langsam.

Die Nationale Bodenbeobachtung NABO beobachtet die Belastung von Böden und deren Entwicklung seit Mitte der 1980er-Jahre. Sie leistet damit einen wichtigen Beitrag um Gefahren für die Bodenfruchtbarkeit frühzeitig zu erkennen. Dazu beprobt die NABO regelmässig ein Referenzmessnetz von rund 100 über die gesamte Schweiz verteilten Dauerbeobachtungsstandorten. Neben den Schadstoffen beobachtet die NABO weitere Aspekte, die die Bodenfunktionen beeinflussen: Nährstoff- und Kohlenstoffgehalt, biologische Aktivität, Bodenverdichtung sowie die Versauerung.

Der vorliegende Bericht präsentiert die Resultate von fünf Erhebungen im NABO-Referenzmessnetz, die zwischen 1985 und 2009 durchgeführt wurden. Der Fokus liegt dabei auf der Entwicklung der Schwermetall- und Kohlenstoffgehalte. Zusätzlich werden auch erste Resultate zur Entwicklung von Nährstoffgehalten auf einem Teil der Beobachtungsstandorte präsentiert. Am Beispiel eines ausgewählten Landwirtschaftsbetriebs wird gezeigt, welchen Mehrwert das so genannte indirekte Monitoring leisten kann. Hierbei werden aufgrund der Bewirtschaftungsdaten Stoffbilanzierungen für die beobachtete Parzelle berechnet. Der Bericht zeigt, dass sich das Konzept der NABO bewährt, er zeigt aber auch, wie es in den nächsten Jahren für neue Fragestellungen optimiert werden soll.

2015 markiert nicht nur 30 Jahre Nationale Bodenbeobachtung, 2015 wurde auch zum internationalen Jahr des Bodens erklärt – es ist international anerkannt, welche wichtige Grundlage die Böden sind. Global gehören die Schweizer Böden zu den fruchtbarsten, daher müssen wir die Qualität unserer Böden auch weiterhin sorgsam im Auge behalten. Wir wünschen allen Leserinnen und Lesern eine anregende Lektüre.

Gérard Poffet  
Vizedirektor  
Bundesamt für Umwelt (BAFU)

Eva Reinhard  
Stellvertretende Direktorin  
Bundesamt für Landwirtschaft (BLW)

## > Zusammenfassung

Der Boden ist die Grundlage unserer Nahrungsmittelproduktion. Negative Entwicklungen, beispielsweise eine Beeinträchtigung der Bodenfruchtbarkeit, müssen deshalb vermieden werden. Die Nationale Bodenbeobachtung (NABO) überwacht mit ihrem Messnetz aus 103 Dauerbeobachtungsstandorten seit 1985 die Entwicklung der Schadstoffgehalte unserer Böden. Die Standorte wurden so ausgewählt, dass unterschiedliche Landnutzungstypen (Ackerbau, Grasland, Wald und Spezialkulturen) vertreten sind. Der vorliegende Bericht präsentiert die Resultate über fünf Erhebungen (1985–2009) für die Schwermetalle Cadmium, Zink, Kupfer, Quecksilber, Blei, Nickel, Chrom und Cobalt sowie für den organischen Kohlenstoff. Für einige ausgewählte NABO-Standorte werden zudem Resultate zu den Hauptnährstoffen Stickstoff, Phosphor und Kalium vorgestellt.

Für die Elemente Cadmium, Nickel, Chrom und Cobalt wurden keine signifikanten Veränderungen über die letzten 20 Jahre beobachtet. Die Gehalte an Blei und Quecksilber hingegen haben im Oberboden deutlich abgenommen. Einerseits zeigen strenge Vorschriften bei der Luftreinhaltung und die Verbannung von bleihaltigem Benzin ihre Wirkung; andererseits wird vermutet, dass mit der Durchmischung des Ober- und Unterbodens durch Bioturbation und/oder mechanische Bodenbearbeitung die Gehalte im Oberboden verdünnt werden.

Im intensiv genutzten Grasland wurden kontinuierlich steigende Konzentrationen von Zink und Kupfer im Oberboden beobachtet. Die besonders starken Zunahmen (>5 % des Richtwertes) wurden durch den Einsatz von Hofdünger (Schweine- und Rindergülle, aber auch Mist) verursacht. Dies geht aus Stoffflussbilanzen hervor, die aufgrund von Bewirtschaftungsdaten der Landwirte berechnet wurden. Zink und Kupfer werden dem Tierfutter als Nahrungsergänzung und zur Leistungssteigerung beigegeben und gelangen über den Hofdünger in den Boden. Der Gehalt der beiden Elemente in der Gülle variiert, je nach Bewirtschaftung, beträchtlich. Untersuchungen haben gezeigt, dass die Menge an Zink und Kupfer im Tierfutter ohne negative Effekte für Nutztiere und Landwirte deutlich reduziert werden könnte.

Die Richtwerte der Verordnung über Belastungen des Bodens (VBBo) zu den untersuchten Elementen werden nur an einzelnen Standorten überschritten, wobei zu hohe Gehalte mehrheitlich durch die Zusammensetzung des Ausgangsgesteins bedingt sind. Die langjährige Nutzung des Bodens mit Spezialkulturen wie Reb-, Obst- oder Gemüsebau führte zu Richtwertüberschreitungen beim Kupfer.

Seit den 1980er-Jahren sind neben der Belastung der Böden durch Schadstoffe immer wieder neue Fragestellungen hinzugekommen. Das gilt beispielsweise für die Rolle des Bodens als Speicher- und Puffermedium im Kontext des Klimawandels. Beim organischen Kohlenstoff konnte für Ackerstandorte eine leichte Abnahme bis Ende der 1990er-Jahre und anschliessend eine leichte Zunahme verzeichnet werden. Die gemessenen Veränderungen sind jedoch relativ gering und liegen im Bereich von 0,1 bis

---

0,2 % organischer Kohlenstoff. Ob es sich hierbei um effektive Veränderungen handelt, wird zurzeit noch im Zusammenhang mit weiteren relevanten Standortfaktoren, wie Wasserhaushalt und Nährstoffgehalte, abgeklärt.

Ähnliche Veränderungen wurden auch bei wichtigen Pflanzennährstoffen wie Stickstoff, Phosphor und Kalium für 16 ausgewählte NABO-Standorte gefunden: Im intensiv genutzten Grünland wurde seit Beginn der Zeitreihe tendenziell eine Zunahme von Stickstoff und Phosphor bis Ende der 1990er-Jahre festgestellt. In den vergangenen zehn Jahren haben sich die Gehalte dieser beiden Hauptnährstoffe im Boden dagegen kaum noch verändert. Ob dieser Befund mit der Einführung des ökologischen Leistungsnachweises (ÖLN) Mitte der 1990er-Jahre in Verbindung gebracht werden kann, ist Gegenstand aktueller Untersuchungen. Mit der Analyse der Nährstoffgehalte aller rund 70 landwirtschaftlich genutzten Standorte im NABO-Messnetz sollen diese Befunde breiter abgestützt werden. Dies gilt ebenso für Kalium, das an den meisten der bisher untersuchten Graslandstandorte kontinuierlich zugenommen hat.

Um Veränderungen und deren Ursachen in Zukunft noch besser erfassen und verstehen zu können, sind bei der NABO verschiedene methodische und konzeptionelle Verbesserungen geplant oder wurden bereits umgesetzt. Insbesondere soll die Synthese der Resultate des Messnetzes mit jenen des indirekten Monitorings (Stoffflussanalysen und Prozessmodellierung) zu einem besseren Verständnis der beobachteten Veränderungen führen. Zusätzliche Punkt- und Flächendaten werden es zudem ermöglichen, regionale bis landesweite Zustände und Szenarien zu erarbeiten.

# 1 > Der Boden – eine knappe Ressource

---

*«Buy land, they're not making it anymore.»*

*Mark Twain, 1835–1910*

---

Bereits vor über 100 Jahren empfahl der amerikanische Schriftsteller Mark Twain, man solle Land kaufen, denn es werde nicht mehr produziert. Der ironisch gedachte Ratsschlag ist heute aktueller denn je, insbesondere wenn fruchtbares Land gemeint ist. Wir zerstören nämlich immer mehr Böden, beispielsweise durch den Bau von Häusern, Gewerbehallen, Strassen und Bahnlinien. Dabei wird vergessen, dass Böden die Grundlage für unsere Nahrungsmittelproduktion sind und viele weitere essentielle Dienstleistungen für Mensch und Umwelt erbringen. Ohne fruchtbare Böden lässt sich weder Getreide noch Gemüse oder Fleisch produzieren.

Besonders in der kleinräumigen und stark bevölkerten Schweiz ist der Boden eine knappe Ressource. Zwischen 1983 und 2007 vergrösserte sich die Siedlungsfläche um 23 % (+490 km<sup>2</sup>). Dieser Zuwachs ging grösstenteils zulasten des Ackerlandes (BFS & BAFU 2011). Die Zustimmung zu politischen Vorstössen wie die Zweitwohnungsinitiative oder die Revision des Raumplanungsgesetzes haben gezeigt, dass der Schutz der Kulturlandschaft und des Ackerlandes in der Bevölkerung als wichtig erachtet wird.

Neben der bereits genannten Produktionsfunktion erfüllt der Boden weitere zahlreiche ökonomische und ökologische Funktionen. Er speichert und filtert unser Trinkwasser, reguliert den Wasserhaushalt und liefert pflanzenverfügbares Wasser. Der Boden ist Lebensraum für Bodenlebewesen und somit Grundlage der Biodiversität. Er puffert Säurebildner aus Luftschadstoffen und trägt zum Klimahaushalt bei, da er Kohlenstoff in der Form von Humus speichert.

Der Boden ist sprichwörtlich auch in seiner Tiefe zu betrachten. In raumplanerische Prozesse wurde diese dritte Dimension bisher kaum miteinbezogen. Die Dienstleistungen des Bodens müssen viel stärker in der Raumplanung berücksichtigt werden, um die vielfältigen Nutzungskonflikte steuern und entschärfen zu können.

Neben dem quantitativen Ziel, die Bodenversiegelung in Zukunft zu minimieren, gibt es das qualitative Ziel, Böden mit ihrer grossen Leistungsfähigkeit zu schützen. Nicht jeder Boden eignet sich gleich gut für die landwirtschaftliche Nutzung, und nicht jeder Boden kann Wasser gleich gut speichern und filtern. Die Qualität eines Bodens hängt von verschiedensten Eigenschaften wie Gründigkeit, Textur, Wasserdurchlässigkeit, Nährstoffverfügbarkeit, Anteil organischer Substanz und vielem mehr ab. Die jeweilige Ausprägung dieser Eigenschaften wurde vor allem durch Klima, Ausgangsgestein, Relief und Vegetation während der Bodenbildung seit der letzten Eiszeit vor ca. 10000

Jahren bestimmt. Durch die landwirtschaftliche Bewirtschaftung kann sich die Bodenqualität verbessern oder verschlechtern. Der Eintrag von Schadstoffen oder zu vielen Nährstoffen, aber auch eine falsche Bewirtschaftung beeinträchtigt die Bodenfruchtbarkeit.

Das Umweltschutzgesetz fordert die langfristige Erhaltung der Bodenfruchtbarkeit (Art. 33 USG 1983). Veränderungen im Boden laufen in der Regel langsam ab, sind aber oft irreversibel (d. h. nicht umkehrbar), wie beispielsweise der Bodenverlust durch Erosion, Bodenverdichtung oder die Anreicherung persistenter Schadstoffe. Aus diesem Grund ist es wichtig, schädliche Veränderungen frühzeitig zu erkennen, um präventive Massnahmen ergreifen zu können.

**Abb. 1** > NABO-Probenahme bei Kiesen BE



In diesem Kontext dient die Nationale Bodenbeobachtung (NABO) seit den 1980er-Jahren der landesweiten Erfassung der Bodenqualität und der Früherkennung von schädlichen Entwicklungen. Zu Beginn der Messungen lag der Fokus auf Schwermetalleinträgen aus der Luft sowie durch landwirtschaftliche Hilfsstoffe wie Pflanzenschutzmittel, Klärschlamm oder Gülle. Die Analysen umfassten auch den Säuregrad des Bodens. Mit der Zeit kamen neue Fragestellungen in der Bodenbeobachtung hinzu. So ermöglichte die stete technische Entwicklung der chemischen Analytik die Untersuchung organischer Schadstoffe – beispielsweise polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK), Biphenyle, Dioxine oder Rückstände von Pflanzenschutzmitteln in Böden (Brändli et al. 2008, Desaulles et al. 2008, Schmid et al. 2005). Seit einigen Jahren werden neben den chemischen auch physikalische und biologische Bodeneigenschaften untersucht. Weil chemische, biologische und physikalische Prozesse im Boden zusammenhängen, kann so eine schleichende Beeinträchtigung der Bodenfruchtbarkeit besser erkannt und interpretiert werden.

Die Verordnung über Belastungen des Bodens verlangt, dass das Bundesamt für Umwelt (BAFU) in Zusammenarbeit mit dem Bundesamt für Landwirtschaft (BLW) ein nationales Referenznetz zur Beobachtung der Belastungen des Bodens (NABO) betreibt (Art. 3 Abs. 1 VBBö 1998). Zu ihren Aufgaben gehören die landesweite Erfassung der aktuellen Bodenbelastungen sowie die frühzeitige Erkennung neuer Belastun-

---

gen und Veränderungen. Diese Aufgabe wird durch die Kombination zweier Instrumente angegangen:

- > Mit einem Messnetz aus Dauerbeobachtungsstandorten, welches vor allem die Hintergrundbelastung in der Schweiz abdecken soll (direktes Monitoring), sowie
- > durch die Erfassung von Stoffflüssen und durch die Modellierung der relevanten Bodenprozesse (indirektes Monitoring; siehe Kap. 2.3).

Durch die Kombination dieser beiden Ansätze ist es möglich, die gemessenen zeitlichen Veränderungen von Bodeneigenschaften zu plausibilisieren. Mit geeigneten Bodenprozessmodellen können die Ursachen der Veränderungen erklärt und folglich Prognosen für zukünftige Entwicklungen gegeben werden.

Der vorliegende Bericht stellt die Ergebnisse der 1. bis 5. Erhebung (1985–2009) des direkten Monitorings im NABO-Messnetz dar. Der Fokus liegt auf der Belastung durch Schwermetalle. Zudem werden die Entwicklung des organischen Kohlenstoffes und die Resultate für 18 Graslandstandorte bezüglich der Nährstoffe und Kationen gezeigt.

---

## 2 > Das NABO-Messnetz

---

Seit Mitte der 1980er-Jahre betreibt die Nationale Bodenbeobachtung (NABO) ein Messnetz aus sogenannten Dauerbeobachtungsstandorten, auf welchen in Abständen von fünf Jahren Bodenproben genommen und analysiert werden. Damit wird die Belastung der Böden durch Schadstoffe erfasst – vor allem die langfristige zeitliche Entwicklung, aber auch die aktuellen Konzentrationen.

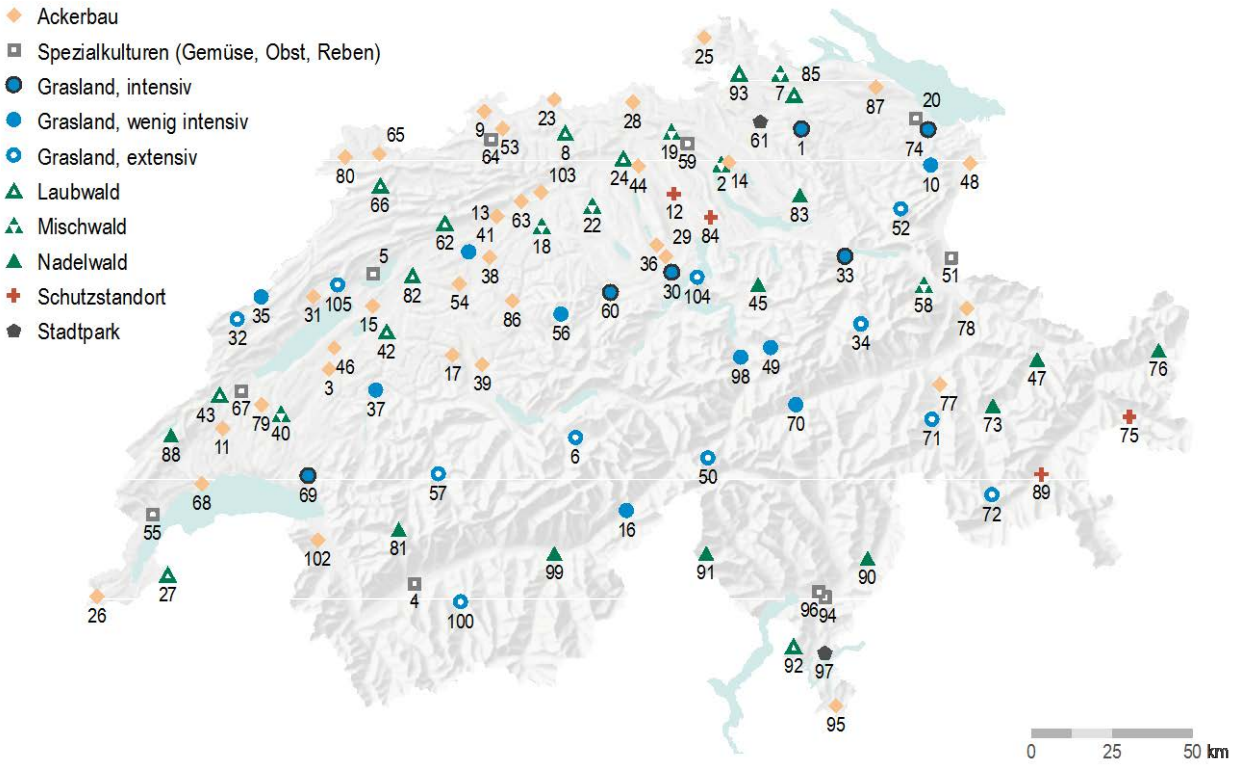
### 2.1 103 Standorte

Das NABO-Messnetz umfasst derzeit 103 Dauerbeobachtungsstandorte, die über die gesamte Schweiz verteilt sind (Abb. 2, Tab. 1). Diese Standorte wurden in den 1980er-Jahren so ausgewählt, dass verschiedene Naturräume der Schweiz sowie unterschiedliche Nutzungs- und Bewirtschaftungstypen vertreten sind. Rund die Hälfte der Standorte wird landwirtschaftlich intensiv genutzt (Acker-, Gemüse-, Obst- und Rebbau, intensives Grasland). Ein Fünftel liegt in extensiv genutzten Flächen (z. B. wenig intensiv genutzte Weiden, Alpweiden), das restliche Drittel befindet sich im Wald. Zudem wurden zwei Beobachtungsstandorte in Stadtpärken eingerichtet.

Die Beobachtungstandorte spiegeln für die Schweiz typische Kombinationen aus Landnutzung, Bodentyp, Geologie, Höhenstufe und anderen Standorteigenschaften wider. Um möglichst praxisnahe Verhältnisse der landwirtschaftlichen oder forstlichen Nutzung wiederzugeben, sind die einzelnen Flächen nicht markiert, abgesperrt oder anderweitig geschützt. Mittels vergrabener Magnete können die Beobachtungsflächen exakt lokalisiert werden. Die Landwirte, welche die Parzellen mit den Dauerbeobachtungsflächen bewirtschaften, werden nicht beeinflusst. Die Resultate des NABO-Messnetzes – beispielsweise zeitliche Veränderungen von Bodeneigenschaften oder Stoffbilanzen – widerspiegeln daher die realen Verhältnisse landwirtschaftlicher Nutzung bzw. die realen Umweltbedingungen. Für viele Fragestellungen, wie die Veränderungen des Gehaltes an organischem Kohlenstoff im Boden, ist dieser Umstand von grosser Bedeutung, weil Aussagen für die oben genannten Kombinationen von Standortfaktoren und Bewirtschaftungen möglich sind.

Detaillierte Angaben zu den Dauerbeobachtungsstandorten und deren Eigenschaften befinden sich in den Berichten von Desaulles & Studer (1993) und Desaulles & Dahinden (2000).

Abb. 2 > NABO-Dauerbeobachtungsstandorte und ihre Nutzung bei der 5. Erhebung





**Tab. 1 > Anzahl Dauerbeobachtungsstandorte NABO**

Für diesen Bericht verfügbar		NABO-Messnetz total	Details
<b>Ackerbau</b>	<b>33</b>	<b>33</b>	Fruchtfolgeflächen
<b>Grasland</b>	<b>25</b>	<b>26</b>	
• intensiv	6	6	mehrmals genutzt & gedüngt
• wenig intensiv	9	9	ca. 3 x genutzt & gedüngt
• extensiv	10	11	Alpweiden oder ungedüngte Naturwiesen
<b>Wald</b>	<b>27</b>	<b>28</b>	
• Laubwald	10	11	
• Mischwald	7	7	
• Nadelwald	10	10	
<b>Spezialkulturen</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	
• Gemüse	3	4	
• Obst	3	3	
• Reben	3	3	
<b>Andere</b>			
• Schutzstandort	4	4	Standorte in Naturschutzgebieten
• Stadtpark	2	2	
<b>Total</b>	<b>100</b>	<b>103</b>	

## 2.2 Beprobung und Analytik

Die Beobachtungsstandorte werden in Abständen von fünf Jahren beprobt. Jedes Jahr wird rund ein Fünftel der Standorte aufgesucht. Seit 1985 wurden insgesamt fünf Erhebungen durchgeführt; derzeit läuft die Feldkampagne für die 6. Erhebung.

Die Beobachtungsstandorte werden jedes Mal an derselben Stelle beprobt. Auf einer Fläche von 10x10 Metern werden vier Mischproben (bestehend aus 25 Einzelproben) von den obersten 20 cm des Bodens entnommen. Zusätzlich wird eine fünfte Mischprobe à 25 Einzelproben genommen, welche direkt nach der Probenahme (d. h. ohne Aufbereitung) eingefroren wird. Die Beprobungstiefe von 0–20 cm entspricht den Vorgaben der VBBo (1998). Seit der 5. Erhebung (ab 2005) kommen Schlagsonden zum Einsatz, die Bodenmaterial aus bis zu 40 cm Tiefe zu Tage fördern. Seit 2010, dem Beginn der 6. Erhebung, werden neben den Flächenmischproben im Oberboden auch Bohrkern bis maximal 1 m Tiefe entnommen, um allfällige Veränderungen im Unterboden nachweisen zu können.

Die Bodenproben werden durch die NABO aufbereitet, getrocknet und gesiebt. In diesem Zustand können die Bodenproben über Jahrzehnte gelagert werden. Die archivierten Proben können jederzeit auf neue Parameter analysiert werden. Eine zusätzliche Mischprobe wird zudem bei –20 °C gelagert. Das NABO-Archiv ist damit eine Art Langzeitgedächtnis der Schweizer Böden und dient für vielfältige Fragestellungen rund um die Bodenqualität als Referenz. Es können in Zukunft chemische Eigenschaften

gemessen werden, die wir heute noch gar nicht kennen oder die gegenwärtig noch nicht gemessen werden können.

**Abb. 3 > Probenahme der Flächenmischproben (4 Proben à je 25 Einzeleinstichen) am Standort Disentis GR sowie Einzeleinstich 0–20 cm**



Interessierte Leser finden Details zu Probenahme, Probenaufbereitung und Analytik im Anhang dieses Berichtes (A1).

### 2.3 Indirektes Monitoring als wichtige Ergänzung

Von 48 landwirtschaftlich genutzten Parzellen des NABO-Messnetzes werden die relevanten Ein- und Austräge von Schadstoffen durch Mineraldünger, Hofdünger, Pflanzenschutzmittel, Luftverschmutzung und Ernte erfasst. Die gemessenen Schwermetallgehalte der Beobachtungsstandorte können mit diesen Stoffflussbilanzen verglichen werden, um die Ursache allfälliger Schadstoffeinträge zu ermitteln. So können Massnahmen zu deren Reduktion abgeleitet werden.

Die bisherigen Ergebnisse deuten darauf hin, dass Widersprüche zwischen den im Boden gemessenen Konzentrationsveränderungen und den aufgrund Stoffflussbilanzen berechneten Veränderungen bestehen. Nicht immer sind hohe Stoffeinträge mit einer Anreicherung im Boden verbunden. Derzeit sind die Aussagen zu Vorratsveränderungen von Stoffen im Boden auf den Oberboden 0–20 cm beschränkt, was sich limitierend auswirkt auf den Vergleich des direkten und indirekten Monitorings. Die zusätzliche Entnahme von Proben über das ganze Profil bis maximal 1 m Tiefe ist ein erster Schritt, um profilumfassend die Vorräte von Stoffen und Verlagerungen in tiefere Bodenschichten erkennen und mit geeigneten Bodenprozessmodellen erklären zu können.

Weiterführende grundlegende Informationen zu den NABO-Stoffflussbilanzen sind im Bericht von Keller et al. (2005) verfügbar, erste Ergebnisse zur dynamischen Modellierung von Phosphor für NABO-Standorte in Della Peruta (2013).

## 3 > Schwermetalle

---

Für die NABO-Standorte liegt inzwischen eine Zeitreihe von fünf Erhebungen vor. Aufgrund der Zeitspanne von 20 Jahren können bereits relativ kleine Konzentrationszunahmen und -abnahmen erkannt werden. In diesem Kapitel werden die Resultate von 100 der aktuell 103 NABO-Standorte präsentiert.<sup>1</sup>

### 3.1 Veränderungen der Schwermetallgehalte im Oberboden

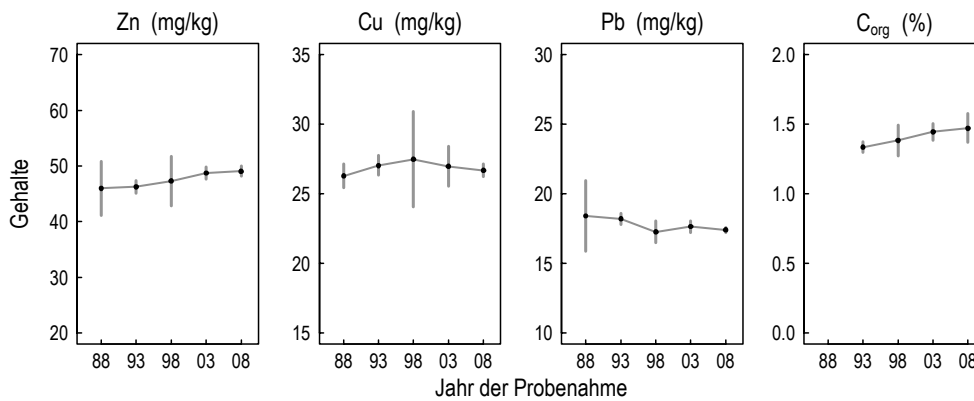
Die Zeitreihen für Zink, Kupfer, Blei und organischen Kohlenstoff ( $C_{org}$ ) am Ackerbaustandort Etoy VD zeigen beispielhaft, wie die einzelnen Werte ermittelt wurden und wie sich die jeweiligen Konzentrationen über 20 Jahre verändern können (siehe Abb. 4). Bei jeder Probenahme wurden vier Flächenmischproben entnommen und analysiert. Für die Auswertung ist der Mittelwert von Interesse (schwarze Punkte in Abb. 4). Aus der Streuung der vier Proben kann ein Vertrauensintervall für den Mittelwert berechnet werden (in Abb. 4 als senkrechte Balken dargestellt; vgl. Anhang A1-5). Die Spannweite des Vertrauensintervalls pro Standort und Erhebung hängt vor allem von der natürlichen Heterogenität des Bodenmaterials ab, aber auch von Faktoren in Zusammenhang mit der Probenahme, der Probenaufbereitung und der Genauigkeit der Analytik.

Am gezeigten Ackerstandort (Abb. 4) sind leichte Zunahmen für die Gehalte an Zink und organischem Kohlenstoff erkennbar. Die Zunahmen sind mit weniger als 5 mg Zink pro kg Feinerde<sup>2</sup> bzw. 0,2 %  $C_{org}$  klein, aber eindeutig. Weiter ist eine leichte Abnahme beim Bleigehalt sichtbar. Für Kupfer ist hingegen kein eindeutiger Trend ersichtlich. Der Kohlenstoffgehalt ist bei der Interpretation der Zeitreihen für Schwermetalle eine wichtige Hilfsgrösse, um Unregelmässigkeiten zu erkennen.

<sup>1</sup> Die Standorte 42 (Galmwald) und 67 (Mathod) konnten für die 5. Erhebung nicht beprobt werden. Standort 104 (Küssnacht) wurde wegen Problemen in der Analytik ebenfalls nicht berücksichtigt.

<sup>2</sup> Die Feinerde ist jener Teil des Bodenmaterials mit Korngrössen kleiner als 2 mm. Die Feinerdefraktion gewinnt man durch Absieben der grösseren Bodenbestandteile, wie Steine.

**Abb. 4** > Gehalte (Mittelwert mit 95 %-Vertrauensintervall) an Zn, Cu, Pb und C<sub>org</sub> von 1988 bis 2008 am Ackerbaustandort Etoy



**Abb. 5** > Gehalte (Mittelwert mit 95 %-Vertrauensintervall) an Cd, Cu, Hg und C<sub>org</sub> von 1989 bis 2009 am Laubwaldstandort Rothenfluh BL (RW: VBo-Richtwert)

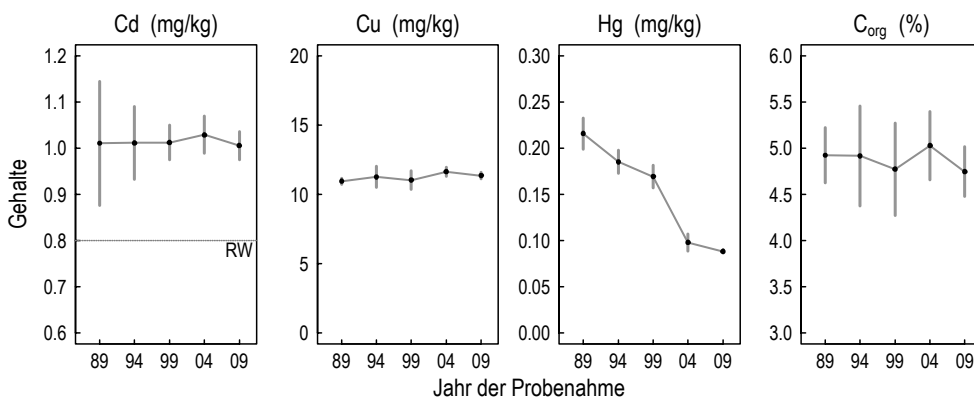


Abbildung 5 zeigt als zweites Beispiel die Entwicklung der Gehalte von Cadmium, Kupfer, Quecksilber und organischem Kohlenstoff am Laubwaldstandort Rothenfluh BL. Abgesehen von einer deutlichen Abnahme bei Quecksilber blieben die Gehalte an diesem Standort unverändert. Der Gehalt an Cadmium liegt aus geologischen Gründen oberhalb des Richtwertes und blieb ebenfalls konstant.

Betrachtet man die zeitlichen Veränderungen jedes Elements über alle NABO-Standorte und aufgeschlüsselt nach Landnutzungstyp (Tab. 2 und Anhang A2-9), so lassen sich verschiedene Tendenzen erkennen. Dabei fallen zum einen die generellen Abnahmen bei Quecksilber und – etwas weniger deutlich ausgeprägt – bei Blei auf. Zum ändern wurden für die Elemente Nickel, Chrom und Cobalt nur wenige Veränderungen registriert. Für Zink und Kupfer findet man 15 bzw. 11 NABO-Standorte mit zunehmenden Gehalten (fast ausschliesslich unter Acker- und Grasland).

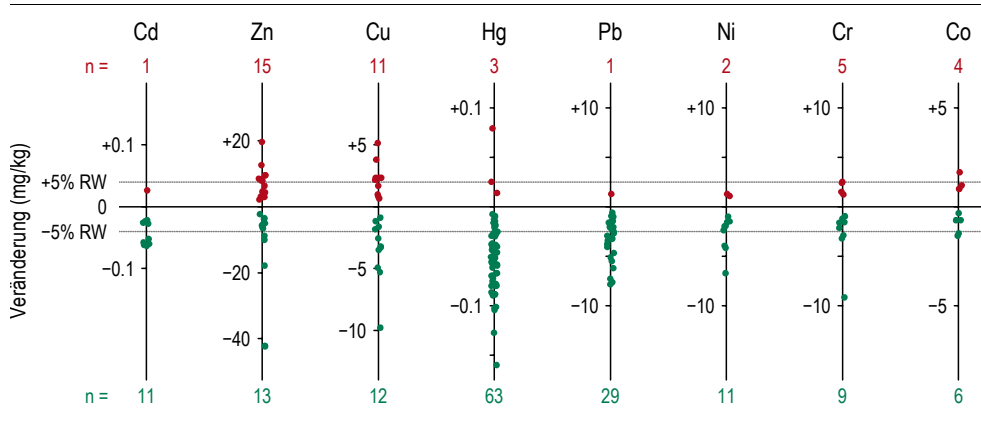
**Tab. 2 > Beobachtete Veränderung für Schwermetallgehalte 1985–2009: Häufigkeit von Zu- und Abnahmen auf NABO-Standorten nach Landnutzung**

Anz. Standorte		Cadmium			Zink			Kupfer			Quecksilber		
		+	0	-	+	0	-	+	0	-	+	0	-
Ackerbau	33	0	29	4	9	21	3	5	22	6	3	12	12
Grasland	25	1	22	2	5	20	0	5	19	1	0	2	23
Wald	27	0	24	1	0	23	4	0	24	3	0	5	22
Spezialkulturen	9	0	8	1	1	7	1	1	7	1	0	6	3
Andere	6	0	3	3	0	1	5	0	5	1	0	2	3
<b>Total</b>	<b>100</b>	<b>1</b>	<b>86</b>	<b>11</b>	<b>15</b>	<b>72</b>	<b>13</b>	<b>11</b>	<b>77</b>	<b>12</b>	<b>3</b>	<b>27</b>	<b>63</b>
Anz. Standorte		Blei			Nickel			Chrom			Cobalt		
		+	0	-	+	0	-	+	0	-	+	0	-
Ackerbau	33	1	23	9	0	28	5	0	28	5	2	30	1
Grasland	25	0	18	7	1	23	1	2	23	0	0	25	0
Wald	27	0	22	5	0	25	2	2	24	1	2	23	2
Spezialkulturen	9	0	5	4	0	6	3	0	7	2	0	6	3
Andere	6	0	2	4	1	5	0	1	4	1	0	6	0
<b>Total</b>	<b>100</b>	<b>1</b>	<b>70</b>	<b>29</b>	<b>2</b>	<b>87</b>	<b>11</b>	<b>5</b>	<b>86</b>	<b>9</b>	<b>4</b>	<b>90</b>	<b>6</b>

Nicht berücksichtigt: Standorte 42, 67 und 104

**Abb. 6 > Größenordnung der Zu- und Abnahmen für Schwermetalle im NABO-Messnetz nach 20 Jahren sowie deren Relation zum jeweiligen VBBo-Richtwert (RW)**

Dargestellt sind die absoluten Differenzen zwischen der 5. und 1. Erhebung. Es sind nur Standorte berücksichtigt, wo Veränderungen beobachtet wurden ( $n$ : Anzahl Standorte mit Zu- bzw. Abnahmen).



Neben der Anzahl Standorte mit Zu- und Abnahmen ist vor allem die Stärke der Veränderung von Bedeutung. Für den vorsorgenden Bodenschutz gibt die *minimale nachweisbare Veränderung* (minimum detectable change, MDC) die Güte des Monitorings an. In Abbildung 6 sind nur Standorte dargestellt, wo eine eindeutige Zu- oder Abnahme registriert wurde. Folglich können mit der Methodik der NABO beispielsweise bereits Unterschiede von  $\pm 0,05$  mg Cadmium pro kg Feinerde im Oberboden erkannt werden. Für Zink und Kupfer sind in der Regel bereits Veränderungen von wenigen mg/kg Feinerde nachweisbar. Eine schleichende Anreicherung von Schadstoffen im

Oberboden kann folglich mit der gewählten Methodik der Probenahme, Probenaufbereitung, Probenarchivierung und der Qualitätssicherung in der Analytik frühzeitig erkannt werden.

Allerdings ist der MDC abhängig von der Heterogenität des jeweiligen Standorts. Je homogener ein Standort ist, desto früher lassen sich Veränderungen zuverlässig erkennen. Die Analyse der Standortheterogenität und deren Einfluss auf die Erkennung zeitlicher Veränderungen ist Gegenstand weiterer Auswertungen. Insgesamt betrachtet erweist sich die Definition der Beobachtungsstandorte auf die relativ kleine Kernfläche von 100 m<sup>2</sup> als grosser Vorteil. Bei europäischen Bodenmessnetzen wurden teilweise Dauerbeobachtungsflächen von bis zu 4 ha definiert (Morvan et al. 2007). In diesen Fällen überlagert die räumliche Heterogenität in der Regel das gesuchte zeitliche Signal.

Die Zu- und Abnahmen der Gehalte können auch in Relation zum Richtwert jedes Elements betrachtet werden. Dies erlaubt eine für alle Elemente einheitliche Bewertung der gemessenen Veränderungen. In Relation zum Richtwert wurden bei Quecksilber, dessen Gehalte deutlich abgenommen haben, die grössten Veränderungen beobachtet.

Relativ zum Richtwert wurden für Zink und Kupfer die grössten Zunahmen beobachtet. Die gemessenen Veränderungen für Cadmium, Nickel, Chrom und Cobalt im Oberboden sind hingegen kaum von Bedeutung und widerlegen frühere Hypothesen (Desaules & Studer 1993), dass der Eintrag diese Elemente über atmosphärische Deposition und landwirtschaftliche Hilfsstoffe eine Anreicherung bewirken würden. Die Gehalte an Nickel, Chrom, Cobalt und teilweise Cadmium werden weitgehend durch die geologischen Bedingungen bestimmt. Weil sich ihre Gehalte während der letzten 20 Jahre nur wenig verändert haben, wird im Rest des Berichtes nicht mehr auf diese Elemente eingegangen. Details zu sämtlichen Elementen liefert Anhang A2.

Die Zunahmen bei Zink und Kupfer beschränken sich auf Ackerbau- und Graslandstandorte. Bei Wiesen und Weiden wird aufgrund der Nutzungsintensität zwischen intensivem, wenig intensivem und extensivem Grasland unterschieden. Intensiv genutzte Standorte werden mehrmals pro Jahr geschnitten und/oder beweidet und entsprechend gedüngt. Im Mittelland sind fünf bis sechs Nutzungen möglich, in höheren Lagen weniger. Wenig intensiv genutzte Standorte werden etwa drei Mal jährlich geschnitten und/oder beweidet und entsprechend weniger gedüngt. Das extensive Grasland setzt sich mehrheitlich aus Alpweiden zusammen, welche nur beweidet und nicht zusätzlich gedüngt werden.

Tabelle 3 zeigt, dass nur bei intensiv genutztem Grasland Zunahmen für Zink und Kupfer gefunden wurden. Die Zeitreihen aller sechs entsprechend genutzten Graslandstandorte finden sich in den Abbildungen 9ff. Die Zunahmen sind auf den Einsatz von Hofdünger zurückzuführen und werden im Abschnitt 0 ausführlicher diskutiert. Bei den Ackerstandorten wurde keine weitere Unterteilung der Standorte vorgenommen. Klassifizierungen – zum Beispiel aufgrund der Fruchtfolge – wären hier denkbar.

Die beobachteten zeitlichen Veränderungen der Konzentrationen im Oberboden sind in Abb. 7 schematisch zusammengefasst. Dabei zeigt sich ein Muster an zeitlichen Trends, das sowohl durch die Nutzung als auch durch die Eigenschaften des Elements bestimmt wird. Die Ursachen der Veränderungen bei Zink und Kupfer sowie Quecksilber und Blei werden in den folgenden Abschnitten diskutiert.

**Tab. 3 > Beobachtete Veränderungen für Schwermetalle bei NABO-Graslandstandorten: Häufigkeit von Zu- und Abnahmen in Abhängigkeit der Nutzungsintensität**

	Anz. Standorte	Zink			Kupfer		
		+	0	-	+	0	-
<b>Grasland</b>	<b>25</b>	<b>5</b>	<b>20</b>	<b>0</b>	<b>5</b>	<b>19</b>	<b>1</b>
• intensiv	6	5	1	0	4	2	0
• wenig intensiv	9	0	9	0	0	9	0
• extensiv	10	0	10	0	1	8	1

**Abb. 7 > Generelle Trends für Schwermetalle nach Landnutzung**

	Cd	Zn	Cu	Hg	Pb	Ni	Cr	Co
<b>Ackerbau</b>	→	↘	↘	↘	↘	→	→	→
<b>Grasland</b>								
intensiv	→	↘	↘	↘	↘	→	→	→
wenig intensiv	→	→	→	↘	↘	→	→	→
extensiv	→	→	↘	↘	→	→	→	→
<b>Wald</b>								
Laub-	→	→	→	↘	→	→	→	→
Misch-	→	→	↘	↘	↘	→	→	→
Nadel-	→	→	→	↘	→	→	→	→
<b>Spezialkulturen</b>								
Gemüse	→	→	→	→	→	→	→	→
Obst	→	→	→	→	→	→	→	→
Reben	→	→	→	↘	↘	→	→	→
<b>Andere</b>								
Schutzstandort	→	↘	→	↘	↘	→	→	→
Stadtpark	↘	↘	→	↘	↘	→	→	→

Abb. 8 > Bodenprobenahme auf einem Graslandstandort von 10 m x 10 m in der Nähe von Trub BE



#### Warum nehmen Schwermetallgehalte ab?

*Schwermetalle sind Elemente und werden deshalb nicht abgebaut. Nimmt der Gehalt eines Elementes im Oberboden ab, so muss es sich folglich an einen anderen Ort verlagert haben. Je nach Element und Standortbedingungen sind daran unterschiedliche Prozesse beteiligt.*

*Schwermetalle können durch Bodenlebewesen in andere Bodenschichten verlagert werden (so genannte Bioturbation). Die landwirtschaftliche Bearbeitung kann ebenfalls zu einer Verlagerung führen, beispielsweise wenn eine grössere Pflugtiefe gewählt wird. In sauren Böden ist zudem die Auswaschung (das heisst der Transport durch Wasserbewegungen im Boden) von Bedeutung.*

*Wird durch Erosion Bodenmaterial weggeschwemmt, so werden auch die darin enthaltenen Schwermetalle mitgenommen. Bestimmte Elemente werden zudem durch Pflanzen aufgenommen und mit dem Erntegut abtransportiert. Weiter können flüchtige Elemente, wie Quecksilber, verdampfen und so in die Atmosphäre entweichen.*

*Alle diese Vorgänge und Prozesse können sich an einem Standort überlagern. Übersteigen die Verluste die Einträge eines Elementes in den Oberboden, so nimmt sein Gehalt ab. Die Schwermetalle sind jedoch immer noch vorhanden, einfach an einem anderen Ort.*



### 3.2 Zink- und Kupfereinträge via Hofdünger

In Böden mit Grasland, das intensiv bewirtschaftet wird, haben die Konzentrationen von Zink und Kupfer kontinuierlich zugenommen. Von den sechs NABO-Standorten dieser Nutzungskategorie zeigen fünf eine deutliche Zunahme bei Zink und vier eine Zunahme bei Kupfer (Abb. 9ff sowie Abb. 32). Bei den übrigen Flächen im Grasland (wenig intensiv oder extensiv genutzt) wurden hingegen keine Zunahmen festgestellt.

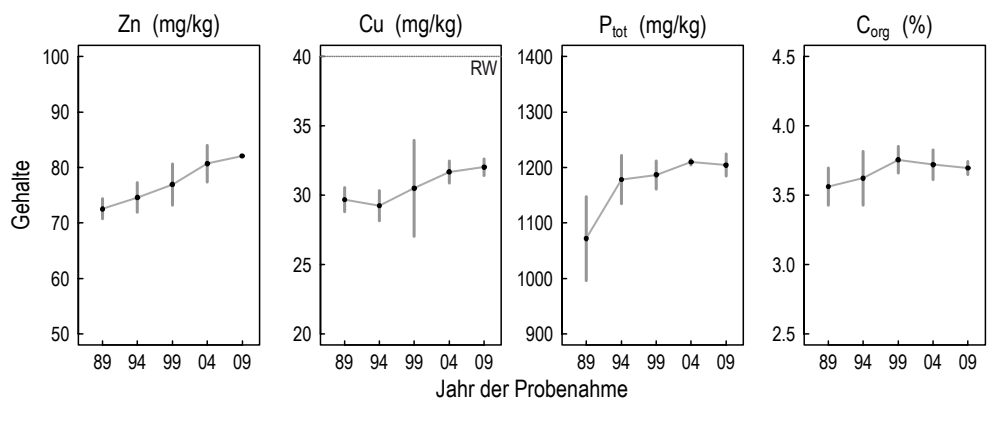
Die Unterscheidung zwischen intensiv, wenig intensiv und extensiv genutztem Grasland wurde entsprechend den «Grundlagen für Düngung und Ackerbau» (GRUDAF; Flisch et al. 2009) definiert. Intensiv genutzte Flächen werden fünf bis sechs Mal pro Jahr geschnitten und/oder beweidet und regelmässig mit Gülle gedüngt. Je nach Betriebsausrichtung und Tierdichte kam auf den oben genannten Standorten Rinder-, Schweine- oder Mischgülle zum Einsatz. Wenig intensiv genutzte Flächen werden deutlich weniger gedüngt; auf extensiv genutzten Flächen (z. B. Alpweiden) fällt oft nur Tierkot bei der Beweidung an. Aufgrund ihrer Höhenlage und Vegetationsdauer widerspiegeln die Graslandstandorte der Tal-, Hügel- und Bergzonen unterschiedliche Bedingungen.

Der Einsatz von Hofdünger schliesst die Kreisläufe von Nährstoffen wie Stickstoff und Phosphor im landwirtschaftlichen System. Hofdünger können jedoch grosse Mengen an Zink und Kupfer enthalten. Diese Elemente werden aus Gründen der Tiergesundheit und zur Leistungssteigerung bestimmten Futtermitteln beigemischt (Bolan et al. 2004; Schultheiss et al. 2004). Zink kann zudem als Bestandteil von Desinfektionsmitteln in den Stall und von dort in den Hofdünger gelangen.

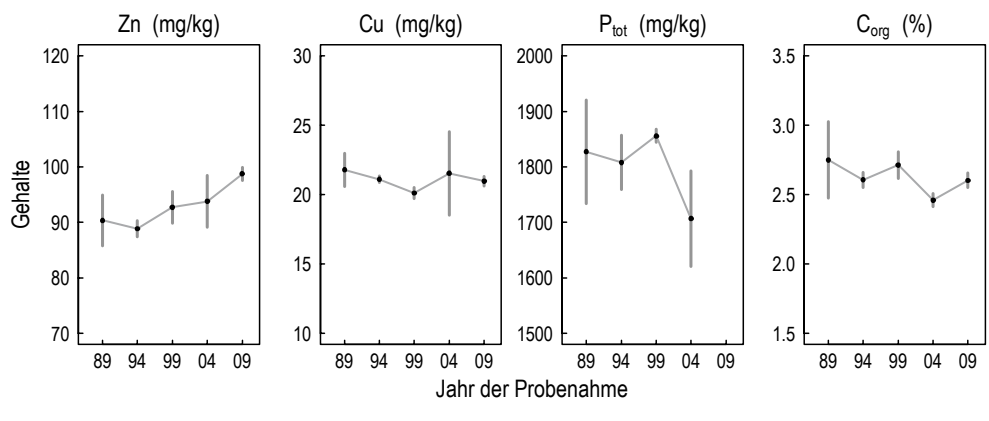
Wie viel Zink und Kupfer im Hofdünger enthalten ist, hängt stark von der Betriebsausrichtung, der Bewirtschaftung (Tierart, Stalltyp) und den eingesetzten Hilfsstoffen ab. Dies bestätigen Analysen der Hofdünger, die seit den 1980er-Jahren in der Schweiz durchgeführt wurden (Menzi et al. 1993; Kessler et al. 1994; Menzi & Kessler 1998; Menzi et al. 1999). Demnach enthält Schweinegülle deutlich höhere Mengen an Zink und Kupfer als Rindergülle, allerdings variieren die Konzentrationen bei beiden Güllearten beträchtlich. Deshalb bestehen bei der Bilanzierung der Stoffeinträge über Hofdünger beträchtliche Unsicherheiten (vgl. Kapitel 3.3; Keller et al. 2002).

Um diese Unsicherheiten zu minimieren, wurden die Hofdünger von 14 landwirtschaftlichen Betrieben im NABO-Messnetz im Jahr 2006 nach der Methode von Menzi & Kessler (1998) beprobt und auf ihre Nährstoff- und Schwermetallgehalte untersucht (Tab. 4). Die gemessenen Nähr- und Schwermetallgehalte waren vergleichbar mit den Resultaten früherer Studien in der Schweiz, jedoch teilweise wesentlich geringer als jene entsprechender Untersuchungen in Nachbarländern (z. B. Schultheiss et al. 2004; Eckel et al. 2005). Letzteres ist auf die grösseren Mastbetriebe im Ausland zurückzuführen mit entsprechend höherem Einsatz von Futterzusatzmitteln und Antibiotika. Für die Bodenbeobachtung sind die parzellenbezogenen Bilanzen bedeutsam und somit die betriebspezifische Qualität der Hofdünger. Diesbezüglich zeigten sich grosse Unterschiede zwischen den Betrieben. Die Standardabweichung in Bezug zum Mittelwert der Zink- und Kupfergehalte der verschiedenen Hofdüngertypen betrug 30 % bis nahezu 100 %.

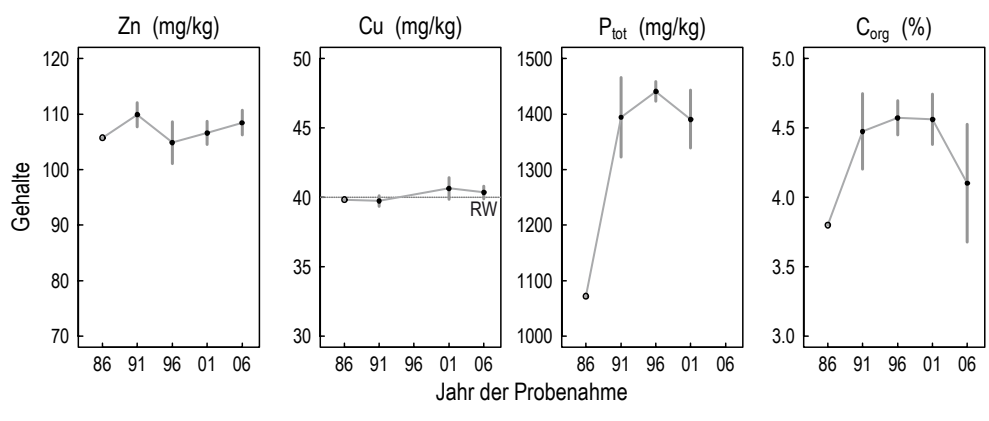
**Abb. 9** > Zeitreihen 1989 bis 2009 von Zn, Cu, P<sub>tot</sub> und C<sub>org</sub> am intensiv genutzten Graslandstandort Tänikon. (RW = Richtwert nach VBBo)



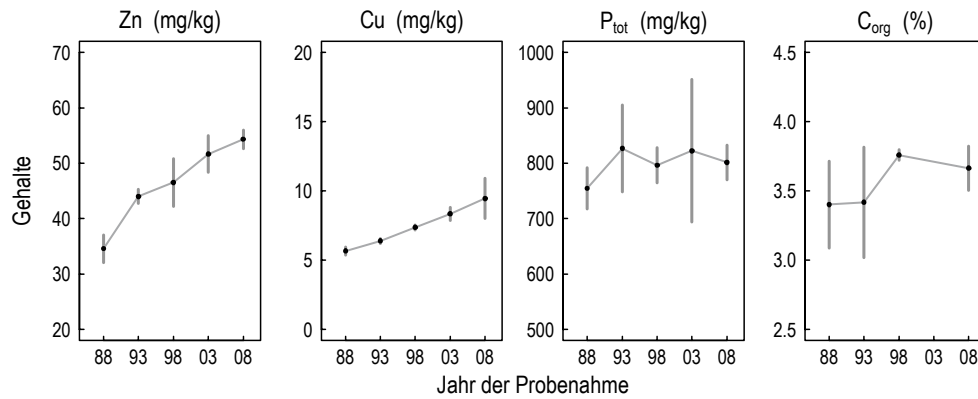
**Abb. 10** > Zeitreihen 1989 bis 2009 von Zn, Cu, P<sub>tot</sub> und C<sub>org</sub> am intensiv genutzten Graslandstandort Ebikon



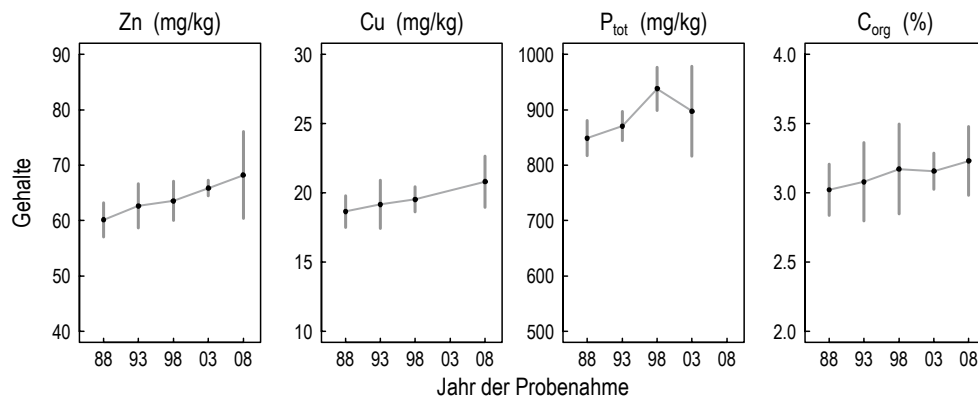
**Abb. 11** > Zeitreihen 1986 bis 2006 von Zn, Cu, P<sub>tot</sub> und C<sub>org</sub> am intensiv genutzten Graslandstandort Mollis. (RW = Richtwert nach VBBo)



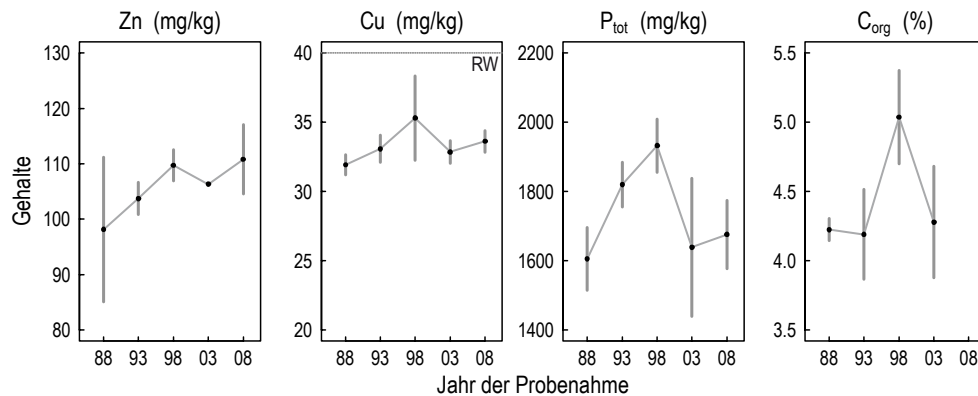
**Abb. 12** > Zeitreihen 1988 bis 2008 von Zn, Cu, P<sub>tot</sub> und C<sub>org</sub> am intensiv genutzten Graslandstandort Entlebuch



**Abb. 13** > Zeitreihen 1988 bis 2008 von Zn, Cu, P<sub>tot</sub> und C<sub>org</sub> am intensiv genutzten Graslandstandort Attalens



**Abb. 14** > Zeitreihen 1988 bis 2008 von Zn, Cu, P<sub>tot</sub> und C<sub>org</sub> am intensiv genutzten Graslandstandort Mörschwil. (RW = Richtwert nach VBBo)



**Tab. 4 > Phosphor-, Zink- und Kupferkonzentrationen in der Gülle von 14 Landwirtschaftsbetrieben im NABO-Messnetz im Jahr 2006**

		Winter/Frühjahr			Sommer			Total		
		P g/kg TS	Cu mg/kg TS	Zn mg/kg TS	P g/kg TS	Cu mg/kg TS	Zn mg/kg TS	P g/kg TS	Cu mg/kg TS	Zn mg/kg TS
Rinder- Vollgülle	Anzahl Proben	15	15	15	6	6	6	21	21	21
	Minimum	4,4	22,5	84,6	5,5	17,2	86,1	4,4	17,2	84,6
	Maximum	11,7	70,5	705,2	10,3	43,1	728,4	11,7	70,5	728,4
	Median	7,2	27,2	102,1	7,1	27,2	122,1	7,2	27,2	113,3
	Mittelwert	7,1	31,7	186,0	7,5	28,3	222,1	7,2	30,7	196,3
	Standardabw.	2,1	12,1	164,5	2,1	8,6	250,3	2,0	11,1	186,8
Schweine- gülle	Anzahl Proben	12	12	12	10	10	10	22	22	22
	Minimum	12,8	77,1	524,6	13,1	55,9	432,0	12,8	55,9	432,0
	Maximum	25,0	196,6	3390,7	24,0	203,8	4244,0	25,0	203,8	4244,0
	Median	19,4	117,4	898,6	18,6	116,4	799,7	18,9	117,4	882,8
	Mittelwert	19,1	125,4	1304,0	18,2	119,5	1341,1	18,7	122,7	1320,8
	Standardabw.	3,8	34,8	990,4	4,1	49,7	1195,7	3,9	41,2	1061,5
Misch- gülle	Anzahl Proben	14	14	14	5	5	5	19	19	19
	Minimum	4,6	15,6	120,0	6,5	25,2	115,5	4,6	15,6	115,5
	Maximum	13,4	140,0	725,2	14,6	191,4	789,5	14,6	191,4	789,5
	Median	10,0	58,3	321,0	9,9	56,9	367,5	9,9	58,0	338,4
	Mittelwert	9,7	68,6	341,1	10,2	72,9	359,5	9,8	69,7	345,9
	Standardabw.	2,4	36,7	190,1	3,7	68,6	274,5	2,7	44,9	207,2

**Abb. 15 > Probenahme für die Hofdüngeranalyse von landwirtschaftlichen Betrieben im NABO-Messnetz**

*Die Güllespeicher wurden mehrere Stunden durchmischt und anschliessend mehrfach über die ganze Tiefe beprobt, um eine repräsentative Probe zu erhalten.*



Eine intensive Bewirtschaftung von Grasland mit viel Hofdünger kann zu einer kontinuierlichen Zunahme von Zink und Kupfer führen. Die effektiven Zunahmen hängen von der ausgebrachten Menge Hofdünger sowie dessen Zink- und Kupferkonzentrationen ab. Zu einem kleineren Teil dürften auch die Eigenschaften des Bodens einen Einfluss haben. Auf den betroffenen NABO-Standorten wurden während 20 Jahren Zunahmen von rund 2 mg Kupfer pro kg Feinerde bzw. 10 mg Zink pro kg Feinerde gemessen. Dies entspricht bei Kupfer 5 %, bei Zink 6 bis 7 % des Richtwertes. Bei einer unverminderten Zunahme würde an diesen Standort in 80 bis 200 Jahren der Richtwert überschritten. Am Standort Entlebuch betrug die Zunahmen über einen Zeitraum von 20 Jahren für beide Elemente mehr als 10 % des Richtwertes.

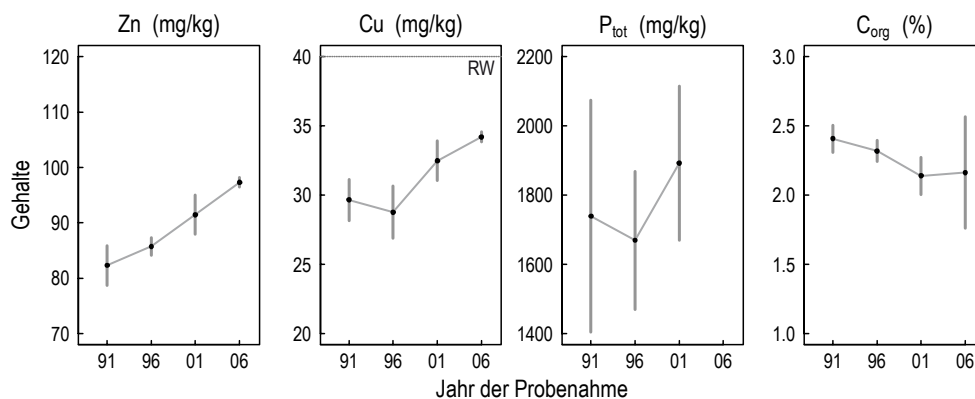
Da die Zink- und Kupfereinträge vor allem über Hofdünger verursacht werden, sind auch die Gehalte von Pflanzennährstoffen wie Stickstoff (N), Phosphor (P) oder Kalium (K) von Interesse, die ebenfalls durch Hofdünger auf die NABO-Flächen gelangen. Für Phosphor bestand die Hypothese, dass an den betroffenen Standorten die P-Konzentrationen im Boden zunehmen. Wäre dies der Fall, könnte P als Indikator verwendet werden, um Veränderungen von Kupfer und Zink in Böden in Zusammenhang mit dem Düngungsregime nachweisen zu können. Die bisherigen Ergebnisse zeigen jedoch, dass zwischen den drei Elementen in den zeitlichen Veränderungen unterschiedliche Muster auftreten können. So wurden bei zunehmenden Zink- und Kupfergehalten auch konstante oder gar abnehmende totale Phosphorgehalte ( $P_{\text{tot}}$ ) im Oberboden beobachtet (vgl. Abb. 9ff).

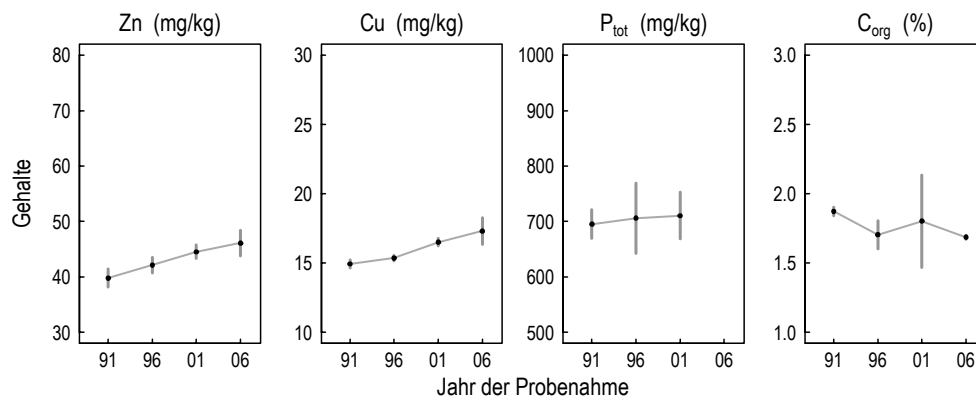
Die gegenläufigen zeitlichen Veränderungen der Zink-, Kupfer- und Phosphorgehalte lassen sich möglicherweise durch ihre unterschiedlichen Eigenschaften erklären. Sie sind deshalb Gegenstand der Prozessmodellierung mit dem Modell EPIC (Della Peruta 2013), welches Sorptionsprozesse im Boden, Verlagerung in tiefere Bodenschichten, Bioturbation, Bodenbearbeitung, Wasserhaushalt und Klima, Pflanzenwachstum und Ernte, Oberflächenabfluss sowie weitere relevante Prozesse berücksichtigt. EPIC modelliert das langfristige Verhalten und den Verbleib der Elemente im Boden. Erste Ergebnisse deuten darauf hin, dass bei Graslandstandorten mit hohen Hofdüngergaben auch abnehmende P-Gehalte im Oberboden plausibel sind, wenn die biologische Aktivität (Bioturbation) eine gewisse Umschichtung von Ober- und Unterboden verursacht. Die Stoffspeicher im Oberboden von Graslandstandorten werden dadurch in tiefere Schichten verfrachtet und mit den Probenahmen im Oberboden des NABO-Messnetzes nicht mehr erfasst.

Einige NABO-Standorte, welche für Ackerbau genutzt werden, zeigen ebenfalls zunehmende Zink- und/oder Kupfergehalte (Abb. 16 und folgende sowie Abb. 4). Auf diesen Standorten wurde unter anderem im Frühjahr Hofdünger zur Grunddüngung ausgebracht. Die Zunahmen dürften folglich wie bei den Graslandstandorten durch Hofdünger verursacht sein.

Die Bodenbearbeitung auf Ackerstandorten kann die zeitlichen Verläufe stark beeinflussen. Wird die Pflugtiefe (einmalig oder permanent) vergrößert, kommt es zu einer Durchmischung von Ober- und Unterboden. Einträge in den Oberboden werden so teilweise in den Unterboden verlagert und durch die NABO-Beprobung der obersten 20 cm nicht mehr erfasst. Tatsächlich wurde für eine Reihe anderer NABO-Standorte, wo ebenfalls Hofdünger ausgebracht wird, keine Zunahmen an Zink oder Kupfer gefunden.

**Abb. 16** > Verläufe von Zn, Cu, P<sub>tot</sub> und C<sub>org</sub> am Ackerstandort Schleithem. (RW = Richtwert nach VBBo)



**Abb. 17** > Verläufe von Zn, Cu, P<sub>tot</sub> und C<sub>org</sub> am Ackerstandort Koppigen

## 3.3

**Zinkbilanz einer NABO-Parzelle**

Zur Illustration der Bedeutung der Hofdünger für Stoffeinträge in landwirtschaftlich genutzte Böden wird im Folgenden beispielhaft die Zinkbilanz eines NABO-Standortes vorgestellt. Der Standort liegt auf einer schwach sauren Braunerde. Die Parzelle gehört zu einem gemischten Milchviehbetrieb mit mittlerer Tierdichte (1,1 Grossvieheinheiten pro Hektare). Die Fruchtfolge besteht hauptsächlich aus Silomais, Winterweizen und Kunstwiese. Als Grunddüngung werden Schweine- und Rindergülle ausgebracht. Daneben werden Mehrnährstoff-Mineraldünger zur Deckung des Pflanzenbedarfs eingesetzt. Bis zum Verbot der Klärschlammausbringung wurde auch vereinzelt Klärschlamm einer nahe gelegenen ARA eingesetzt.

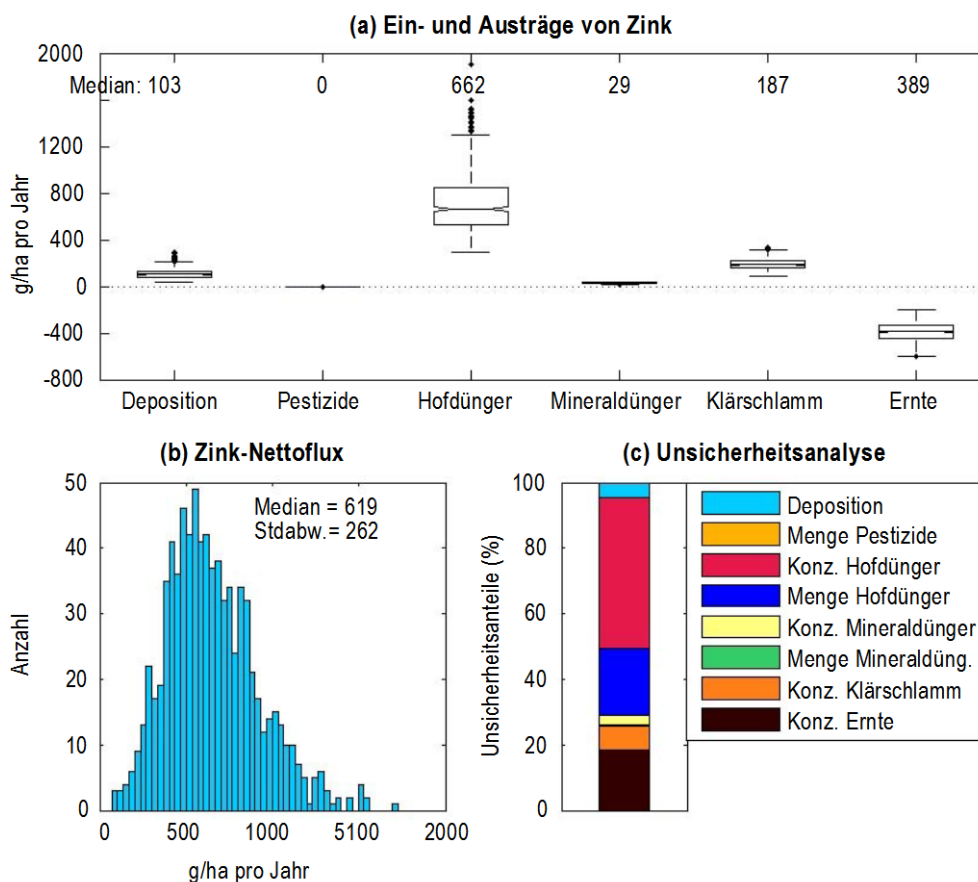
Gemittelt über die Jahre 1996 bis 2006 betragen die jährlichen Zinkeinträge durch Hofdünger 662 g/ha, durch Klärschlamm 187 g/ha und durch atmosphärische Deposition 103 g/ha (Abb. 18a). Gegenwärtig können die Stoffbilanzen nur für diese Zeitperiode berechnet werden, da die Bewirtschaftungsdaten aufgrund unterschiedlicher Erhebungsmethoden noch nicht von 1985 bis 2010 vorliegen. Durch die Ernte wurden 40 % der Einträge dem Boden wieder entzogen, woraus ein jährlicher Zink-Nettoflux von 619 g/ha resultierte (Abb. 18b). Folglich sollte der Zinkgehalt im Oberboden über 20 Jahre um 5 bis 6 mg pro kg Feinerde zunehmen. Die gemessenen Gehalte zeigen jedoch eine leichte Abnahme im Oberboden von 62,5 mg/kg in der 1. Erhebung auf 58,5 mg/kg in der 5. Erhebung. Die Phosphorgehalte (total sowie pflanzenverfügbar) blieben in diesem Zeitraum stabil, währendem der totale Stickstoffgehalt leicht abnahm.

Für einen Ackerbaustandort ist es plausibel anzunehmen, dass durch die Bodenbearbeitung das Material des Pflughorizontes mit tieferen Bodenschichten vermischt wird. Dennoch wird anhand dieses Beispiels deutlich, dass für die Bodendauerbeobachtung im indirekten Monitoring eine vereinfachte Oberflächenbilanz nicht genügt. Es ist eine erweiterte Bodenprozessbilanz erforderlich, die relevante Prozesse für den langfristigen Verbleib von Nähr- und Schadstoffen im Boden berücksichtigt. Zudem kann ein voll-

ständiger Vergleich von indirektem und direktem Monitoring nur erreicht werden, wenn die zeitlichen Veränderungen von Stoffmengen auch im Unterboden bekannt sind.

**Abb. 18** > Beispiel für eine vereinfachte Zinkbilanz (Durchschnitt 1996–2006) für eine Ackerbauparzelle eines gemischten Milchviehbetriebs mit mittlerer Tierdichte von 1,1 GVE/ha

(a) Boxplot der Ein- und Austräge; (b) Histogramm der Einträge minus des Austrags (Nettoflux); (c) Unsicherheitsanalyse.



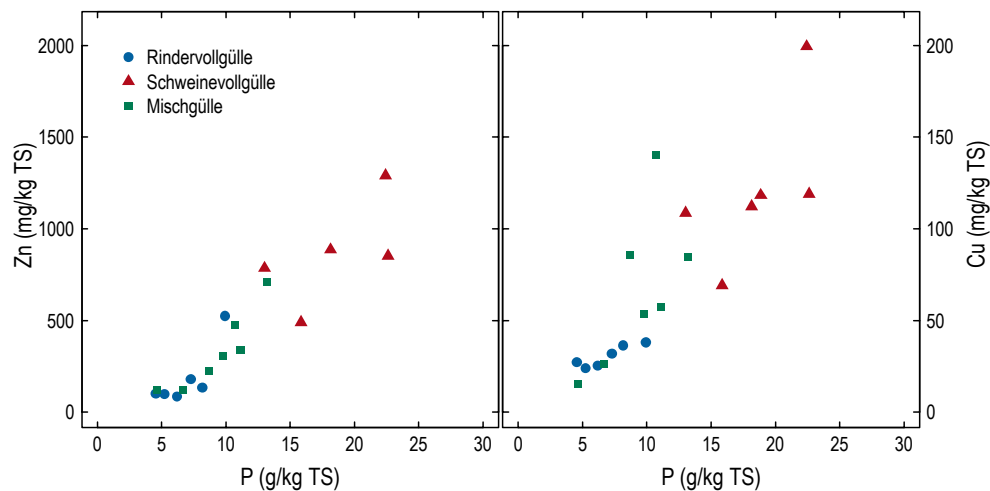
Die Zuverlässigkeit der parzellenbezogenen Stoffbilanzen wurde mittels einer stochastischen Methode abgeschätzt, welche die Unsicherheiten der Bilanzdaten sowie die räumliche und zeitliche Variation der Bilanzgrößen berücksichtigt (Keller et al. 2005). Die Zuverlässigkeit war in erster Linie von der Unsicherheit der Konzentrationsdaten der landwirtschaftlichen Hilfsstoffe abhängig und weniger von der Unsicherheit der erfassten Mengenangaben. Je nach Bewirtschaftung, Betriebstyp, Kultur und Element waren die Nettobilanzen unterschiedlich sensitiv auf die definierten unsicheren Bilanzgrößen. Die Streuung der Bilanzen für Zink und Kupfer betrug rund die Hälfte ihres jeweiligen Mittelwertes. Diese grosse Streuung wurde im Wesentlichen durch unsichere Messdaten für die Konzentrationen im Hofdünger und den geernteten Pflanzen verursacht. Beim oben gezeigten Beispiel wurden über 40 % der Unsicherheit durch die Streuung der Zinkgehalte im Hofdünger erklärt (Abb. 18c).



Die Zink- und Kupfergehalte im Hofdünger variieren sehr stark zwischen den Betrieben, zeigen aber gleichzeitig eine ausgeprägte Korrelation mit dem Phosphorgehalt des Düngers. Dieser Zusammenhang wurde bereits von Menzi et al. (1993) dokumentiert und auch für die Hofdüngieranalysen von 14 NABO-Betrieben gefunden (Abb. 16). Die Korrelation ist durch die Fütterung (Kraft- und Futterzusatzmittel) bedingt. Der Zusammenhang zwischen Zink-, Kupfer- und Phosphorgehalten kann genutzt werden, um die Zuverlässigkeit der parzellenbezogenen Stoffbilanzen für NABO-Standorte zu erhöhen. Für das direkte und indirekte Monitoring bedeutet dies, dass neben den Schadstoffbilanzen auch die Nährstoffe zu berücksichtigen sind. So sind zeitliche Veränderungen von Schadstoffen im Boden einer landwirtschaftlich genutzten Parzelle wesentlich besser interpretierbar, wenn sie im Kontext der Bewirtschaftung und der entsprechenden Veränderungen von Phosphor, Stickstoff, Kalium und weiteren Makronährstoffen gesehen werden.

**Abb. 19** > Zusammenhang zwischen den Gehalten an Phosphor, Zink und Kupfer in der Gülle von 14 Landwirtschaftsbetrieben im NABO-Messnetz im Jahr 2006

*Die Schweinegülle eines Betriebes enthielt 3400 mg/kg TS an Zink und liegt somit ausserhalb des dargestellten Wertebereichs. Der Kupfergehalt dieser Gülle liegt bei 120 mg/kg TS.*



### 3.4 Abnehmende Schwermetalleinträge aus der Luft

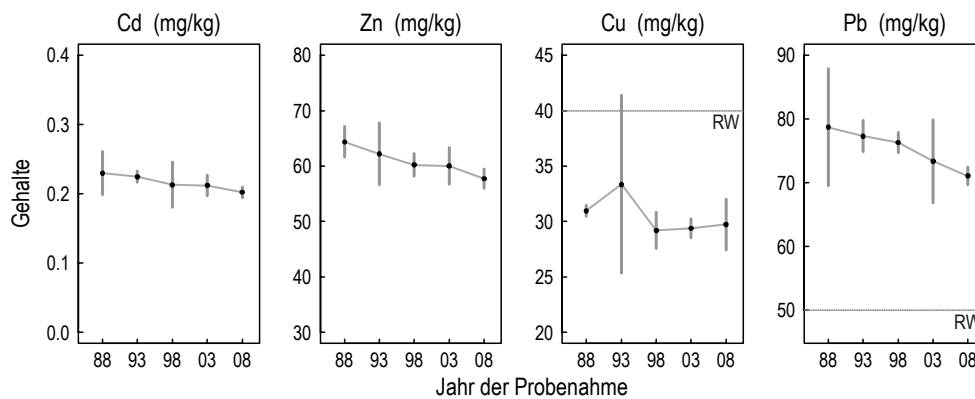
Seit Ende der 1980er-Jahre haben die Gehalte an Blei und Quecksilber im Oberboden für viele Landnutzungen abgenommen. Auf NABO-Flächen, die in Naturschutzgebieten liegen, wurden zudem abnehmende Gehalte für Zink beobachtet. Die beiden Standorte in Stadtpärken zeigten gar Abnahmen bei Zink und Cadmium, während die Kupfergehalte gleich blieben (vgl. Standort Winterthur in Abb. 20).

Eine wichtige Quelle für Quecksilber und Blei ist der Eintrag aus der Luft via Trockendeposition. Das bedeutet, dass sie im Feinstaub enthalten sind und mit diesem an der Bodenoberfläche abgelagert werden. Verschiedene Massnahmen wie die Sanierung von Kehrlichtverbrennungsanlagen und Krematorien oder die Verbannung des Bleis aus

dem Benzin führten dazu, dass die Einträge aus der Luft deutlich abgenommen haben. So hat das Nationale Beobachtungsnetz für Luftfremdstoffe (NABEL) über die letzten 20 Jahre deutliche Abnahmen von Blei, Cadmium und Zink im Feinstaub beobachtet (BAFU 2012).

Die Deposition von Schadstoffen kann aufgrund ihrer Konzentration in Moosen abgeschätzt werden (Thöni et al. 2013). Landesweit nahm von 1990 bis 2010 die Konzentration von Cadmium in Moosen um 58 % ab, jene von Quecksilber um 40 %. Die Konzentration von Blei nahm gar um 87 % ab, jene von Zink um 33 %. Für Kupfer wurde in Moosen hingegen keine Veränderungen beobachtet.

**Abb. 20** > Verläufe 1988 bis 1993 von Cd, Zn, Cu und Pb im Stadtpark Winterthur (Standort 61)



Die Deposition aus der Luft ist an den meisten NABO-Standorten nach wie vor die wichtigste Quelle für Blei und Quecksilber. Der starke Rückgang der Einträge führte im Zusammenspiel mit der bereits erwähnten Bioturbation bzw. dem chemisch-physikalischen Umweltverhalten der Elemente vielerorts zu einer Abnahme der Konzentrationen im Oberboden (vgl. Kasten in Kapitel 3.1).

Abb. 21 > Probenahme in einem Stadtpark in Winterthur



Im Gegensatz zu Quecksilber und Blei wurde für Zink nur an wenigen Standorten eine Abnahme gefunden. Ein Grund dafür dürfte sein, dass zwar die industriellen Emissionen abgenommen haben, jene aus dem Verkehr (Reifenabrieb) jedoch zunehmen (BAFU 2012). Die Konzentrationen in Moosen (Thöni et al. 2013) weisen darauf hin, dass die Einträge aus der Luft weniger deutlich abgenommen haben als bei anderen Elementen.

Auch für Cadmium hat die Deposition aus der Luft stark abgenommen. Dies spiegelt sich jedoch bisher nicht in den zeitlichen Gehaltsveränderungen im Boden wider. Die Einträge in landwirtschaftlich genutzte Flächen via Mineral- und Hofdünger sind in der Regel deutlich grösser als die Deposition (Keller et al. 2005). Diese dürfte an vielen Standorten eine untergeordnete Rolle spielen. Beim Kupfer hingegen decken sich die Resultate der NABO mit jenen des Moosmonitorings: Die Gehalte blieben unverändert.

Die Messwerte der NABO von 1985 bis 2009 zeigen erfreuliche Tendenzen: Verschiedene Massnahmen, welche seit den 1980er-Jahren zur Reduktion von Schwermetallemissionen ergriffen wurden, haben sich positiv auf die Böden ausgewirkt. Abgesehen von Zink und Kupfer sind in näherer Zukunft keine Zunahmen der Schwermetallgehalte in Böden zu erwarten. Das Monitoring für Cadmium, Quecksilber, Blei, Nickel, Chrom und Cobalt könnte demnach stark reduziert werden. Diese Einschätzung muss jedoch regelmässig überprüft und durch stichprobenartige Kontrollmessungen innerhalb des NABO-Messnetzes überprüft werden. Neue Technologien sowie veränderte gesetzliche Bestimmungen können die Belastungssituation jederzeit verändern. Ein Beispiel dafür ist eine allfällige zukünftige Verwendung von Pflanzenkohle (Biochar) und/oder aus Klärschlamm rezyklierten Phosphordüngern.

## 4 > Organischer Kohlenstoff

Die organische Substanz im Boden ist von zentraler Bedeutung für vielfältige Bodenfunktionen wie den Nährstoff-, Luft- und Wasserhaushalt, das Pflanzenwachstum sowie die Puffer-, Abbau- und Filterprozesse. Zudem begünstigt sie die Strukturstabilität im Boden. Die Abnahme der organischen Substanz im Boden wurde in der Europäischen Bodenschutzstrategie (EU Soil Thematic Strategy, CEC 2006) als eine der acht grössten Gefahren für den Boden eingestuft. Vor diesem Hintergrund und in Anbetracht der prognostizierten Abnahme der organischen Substanz im Boden als Folge des Klimawandels sind entsprechende Zeitreihen aus der Bodenbeobachtung unerlässlich.

**Abb. 22 > NABO-Probenahme in einem Hochmoor nahe St. Moritz**



4.1

### Grasland

In Abb. 23 sind oben die Zeitreihen für den organischen Kohlenstoffgehalt im Oberboden der Graslandstandorte dargestellt. Weil die Variation zwischen den Standorten gegenüber den zeitlichen Änderungen dominiert, werden zur besseren visuellen Darstellung die Gehalte jeweils zentriert auf den Mittelwert des Standortes dargestellt (Abb. 23 unten).

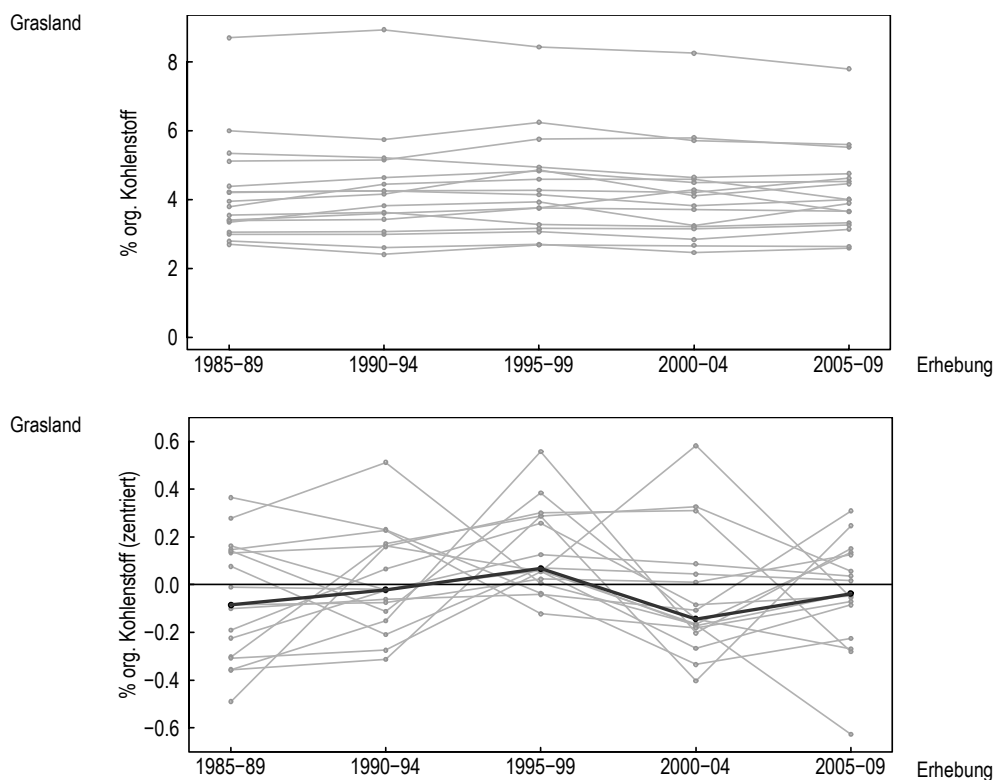
Die Kohlenstoffgehalte im Boden der Graslandstandorte zeigen tendenziell eine leichte Zunahme bis Ende der 1990er-Jahre. Seither nehmen sie wieder leicht ab. Die Veränderungen sind allerdings relativ gering im Vergleich zu den zufälligen Fehlern bei der Analyse, der Probenaufbereitung und der Probenahme sowie im Vergleich zur räumlichen Heterogenität der NABO-Parzellen. Zudem müssen bei der Interpretation effektiver Veränderungen auch Fehler in Betracht gezogen werden, welche durch ungleiche

Bedingungen bei den Probenahmen (anderer Wassergehalt und damit anderes Raumgewicht) verursacht werden können (vgl. Kapitel 2.5.2 in Meuli et al. 2014). So wurde die 3. Erhebung im Schnitt ein bis zwei Monate früher als die anderen Erhebungen durchgeführt. Es wird daher vermutet, dass die Böden in der Dritterhebung im Mittel nasser waren als bei den anderen Erhebungen und dass dies einen Einfluss auf die gemessenen Kohlenstoffgehalte hatte. Diese Hypothese wird bei der Betrachtung der Waldstandorte (Kapitel 4.3) näher erläutert.

Ob die leichten Zu- und Abnahmen an organischem Kohlenstoff auf Graslandstandorten effektive Veränderungen sind, muss zusammen mit den Nährstoffgehalten und dem Düngungsregime beurteilt werden. Die Stickstoffgehalte von neun ausgewählten Graslandstandorten zeigen ein ähnliches zeitliches Muster (siehe Kapitel 5). Bestätigt sich dieser Zusammenhang mit Messungen der Nährstoffgehalte von weiteren Graslandstandorten, können die Veränderungen der Kohlenstoffgehalte mit der Bewirtschaftung und Nutzungsintensität der Parzellen, welche im indirekten Monitoring erhoben werden, quantitativ ausgewertet und modelliert werden. Auf diese Weise können letztlich die gemessenen zeitlichen Veränderungen in die effektiven Veränderungen (Signal mit Ursachenanalyse) und in zufällige und systembedingte Fehler (Grundrauschen) separiert werden (Keller et al. 2006). Damit können zuverlässige Aussagen für den Vollzug im Bodenschutz und für politische Entscheide getroffen werden.

**Abb. 23** > Organischer Kohlenstoff für Oberböden (0–20 cm) der NABO-Graslandstandorte (n=17)

*Oben: Zeitreihe mit absoluten Gehalten (FAL-Referenzmethode); Unten: Gehalte zentriert auf den jeweiligen Mittelwert des Standortes. Dunkle Linie: Median.*

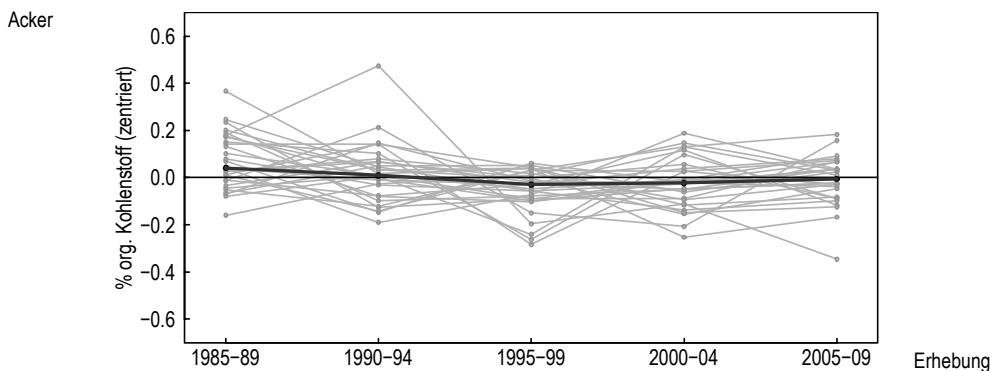


## 4.2 Ackerbau

Für die Ackerbaustandorte ist eine leichte Abnahme bis Ende der 1990er-Jahre erkennbar, gefolgt von einer leichten Zunahme (Abb. 24). Die zeitlichen Veränderungen liegen im Bereich von 0,1 % organischem Kohlenstoff. Aufgrund der landwirtschaftlichen Bodenbearbeitung variieren die Messwerte zwischen den Erhebungen deutlich weniger als etwa bei Graslandstandorten, womit auch zeitliche Veränderungen schneller erkennbar sind. Ob die beobachteten Veränderungen methodisch bedingt, zufällig sind, oder ob gar ein Zusammenhang mit der Einführung des ökologischen Leistungsnachweises besteht, kann derzeit noch nicht beantwortet werden. Dazu bedarf es weiterer Untersuchungen, wie die Erstellung von Kohlenstoffbilanzen für die NABO-Parzellen aufgrund der erhobenen Bewirtschaftungsdaten.

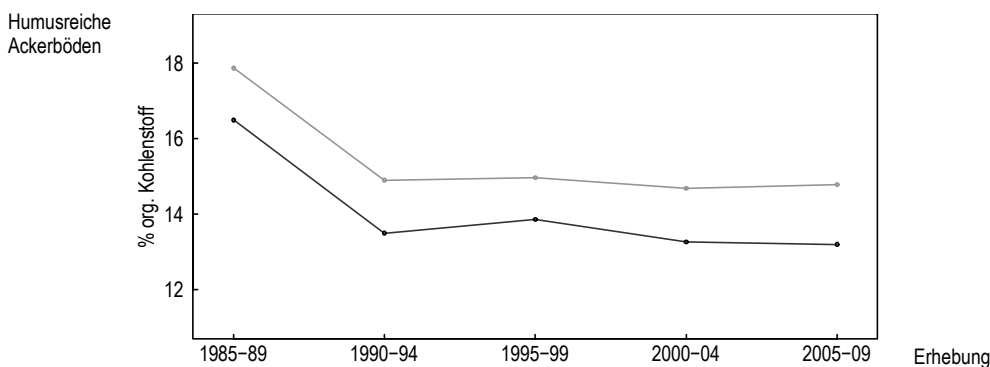
**Abb. 24** > Gehalt an organischem Kohlenstoff für Oberböden (0–20 cm) der NABO-Ackerstandorte (n=29), jeweils zentriert auf den Mittelwert des Standortes

*Dunkle Linie: Median.*



**Abb. 25** > Gehalt an organischem Kohlenstoff für die Oberböden (0–20 cm) zweier NABO-Ackerstandorte auf ehemals organischen Böden

*Helle Linie: Standort 48 – Oberriet; dunkle Linie: Standort 15 – Ins.*



Für zwei Ackerbaustandorte mit ursprünglich über 15 % Kohlenstoff im Oberboden waren als Folge der Bodenbearbeitung sehr hohe Abnahmen an Kohlenstoff zu ver-

zeichnen (vgl. Abb. 25); aus grafischen Gründen sind diese Standorte in Abb. 24 nicht dargestellt.

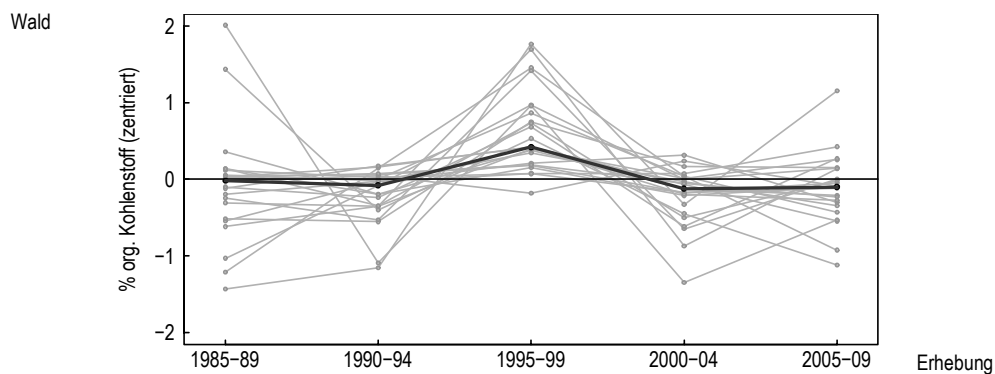
### 4.3 Wald

Für Waldböden zeigen die gemessenen Gehalte für organischen Kohlenstoff deutliche Veränderungen bei der 3. Erhebung (Abb. 26). Insbesondere die Böden unter Nadelwald mit höheren Kohlenstoffgehalten und teils ausgeprägten organischen Auflagehorizonten weisen für diese Erhebung Gehalte auf, welche bis zu 2,5 % über jenen der 2. und 4. Erhebungen liegen. Für Böden unter Laubwäldern mit weniger organischem Material im Oberboden ist dieser Effekt hingegen kaum nachweisbar.

Abklärungen zu möglichen kurzfristigen Veränderungen und deren Ursachen (Desaulles et al. 2004) und weitere detaillierte Standortuntersuchungen lassen darauf schließen, dass es sich bei diesen gemessenen Veränderungen um methodische Fehler handelt. Bei einer fixen Probenahmetiefe von 0–20 cm verursachen Unterschiede im Wassergehalt des Bodens systematische Fehler – besonders bei Böden mit einem hohen Kohlenstoffgehalt. Je nach Wassergehalt dehnt sich das organische Material leicht aus oder zieht sich zusammen. Dieses als Quellen und Schrumpfen bekannte Phänomen kann einen Einfluss auf die Zusammensetzung des Probenmaterials in der Probertiefe 0–20 cm haben. Dies wirkt sich vor allem dann stark aus, wenn in den obersten Bodenschichten extreme Horizontwechsel (Auflagehorizonte und mineralische Horizonte) vorkommen. Bei einem feuchten und somit gequollenen Boden sind dabei grössere Kohlenstoffgehalte in der Probertiefe 0–20 cm zu erwarten (vgl. Kapitel 4.4 sowie Meuli et al. 2014). Bei der Planung der kommenden Probenahmen wird deshalb darauf geachtet, dass die Proben möglichst zu den gleichen Standortbedingungen entnommen werden. In zu trockenen oder zu nassen Perioden werden die Standorte nicht beprobt.

**Abb. 26** > Gehalt an organischem Kohlenstoff für Oberböden (0–20 cm) der NABO

Waldstandorte ( $n=23$ ), jeweils zentriert auf den Mittelwert des Standortes. Dunkle Linie: Median.



## 4.4

**Standardisierung der Zeitreihen**

Um systematische Fehler durch die Probenahme korrigieren und die gemessenen Kohlenstoffgehalte einer Zeitreihe auf gleiche Standortbedingungen standardisieren zu können, wurden ab der 4. Erhebung die Parameter Raumgewicht und Wassergehalt der Feinerde in das Messprogramm aufgenommen. Das Raumgewicht zeigt, welche Masse an Feinerde in einem bestimmten Bodenvolumen enthalten ist; seine Einheit ist  $\text{g}/\text{cm}^3$ . Nimmt der Wassergehalt zu, dehnt sich das Bodenmaterial aus und das Raumgewicht verringert sich dementsprechend. Die Ausdehnung des Bodens wird hauptsächlich durch Tonminerale und organische Materie verursacht: Beide quellen auf, wenn Wasser zugefügt wird.

Für rund zwei Drittel der NABO-Standorte liegen Raumgewichtsmessungen sowohl für die 4. als auch die 5. Erhebung vor (Abb. 27, links). Die Ergebnisse zeigen, dass das Raumgewicht von Erhebung zu Erhebung gut reproduziert werden kann, obwohl es infolge von Schwankungen des Wassergehalts um bis zu  $0,2 \text{ g}/\text{cm}^3$  variieren kann. Es ist weiter ersichtlich, dass der Zusammenhang zwischen Raumgewicht und Wassergehalt von Standort zu Standort unterschiedlich ist. Bei den einen Standorten veränderte sich das Raumgewicht trotz grosser Unterschiede im Wassergehalt kaum, an anderen Standorten hingegen reagierte das Raumgewicht sehr sensitiv auf den Wassergehalt. Die Unterschiede zwischen den Standorten entstehen hauptsächlich durch Unterschiede bei Menge und Zusammensetzung der Tonminerale und der organischen Substanz.

Wie erwartet, weisen Böden mit grösseren Anteilen an organischer Substanz tiefere Raumgewichte auf (Abb. 27, rechts). Betrachtet man indes die Veränderungen zwischen den Erhebungen standortweise, so ist für einige Standorte kein Zusammenhang zwischen Raumgewicht und Kohlenstoffgehalt sichtbar. Daneben gibt es Standorte, wo eine Zunahme beim Raumgewicht mit einer Abnahme beim Kohlenstoffgehalt einhergeht, aber auch solche, wo Raumgewicht und Kohlenstoffgehalt sich in die gleiche Richtung veränderten. Dies erscheint auf den ersten Blick inkohärent, lässt sich aber aufgrund der Verteilung des Kohlenstoffes im Boden erklären. Zudem sind bei den gezeigten Daten auch effektive Veränderungen der Kohlenstoffgehalte plausibel. In der gezeigten Grafik lassen sich effektive und durch die Probenahme bedingte Veränderungen nicht unterscheiden.

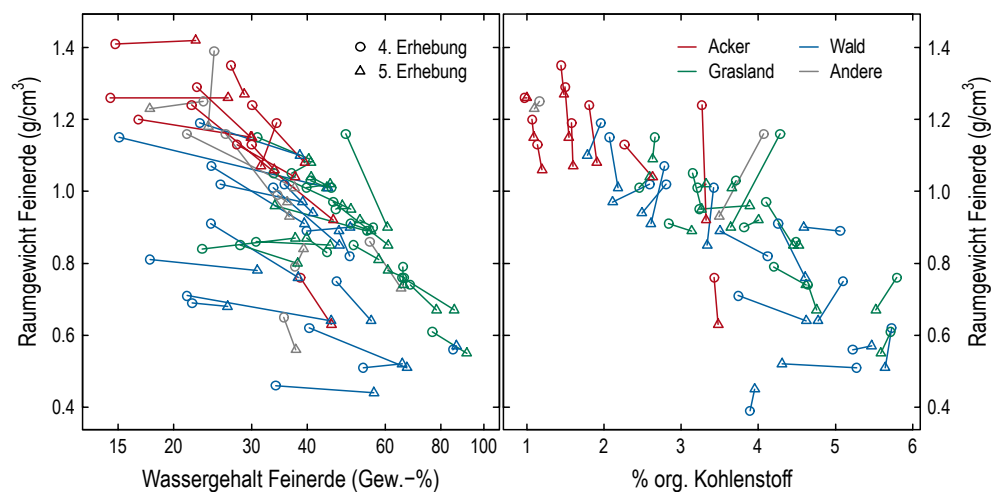
Die NABO beprobt stets die obersten 20 cm gemessen von der Bodenoberfläche. Wird der Boden im feuchten Zustand beprobt, so ist der relative Anteil der obersten Bodenschichten in den entnommenen Proben grösser im Vergleich zu einer Probenahme bei trockenem Bodenzustand. Bei Böden unter Wald und Grasland ist der Gehalt an organischem Kohlenstoff in den obersten Bodenhorizonten in der Regel deutlich höher als in den darunter liegenden. Somit sind in den Bodenproben höhere Kohlenstoffgehalte zu erwarten, wenn der Boden bei der Probenahme feuchter ist; der Kohlenstoffgehalt wird somit überschätzt. In Ackerböden ist der Kohlenstoff aufgrund der Bearbeitung mit dem Pflug zumeist gleichmässig im Oberboden verteilt. Deshalb wird für wiederholte Beprobungen eines Standortes keine Korrelation zwischen Wassergehalt und Kohlenstoffgehalt der Proben bzw. Raumgewicht und Kohlenstoffgehalt erwartet.



Mit der zusätzlichen Erhebung des Raumgewichtes – in Kombination mit Kenntnissen über die Tiefengradienten der Kohlenstoffkonzentrationen – wird es der NABO in Zukunft möglich sein, die gemessene Zeitreihe der Kohlenstoffgehalte auf vergleichbare Standortbedingungen zu standardisieren (Ellert & Bettany 1995; Schrumpf et al. 2011). Damit können die oben beschriebenen systematischen Fehler weitgehend eliminiert werden und Veränderungen des Kohlenstoffgehaltes besser erkannt werden. Für die ersten drei Erhebungen im NABO-Messnetz sind allerdings retrospektiv Schätzungen für den Wassergehalt im Boden erforderlich. Diese sollen mit Hilfe von Klimadaten und dem Prozessmodell EPIC geschätzt werden.

**Abb. 27** > Das Raumgewicht der Feinerde bei der 4. und 5. Erhebung in Abhängigkeit des Wassergehaltes (links; n = 58 Standorte) sowie des Gehaltes an organischem Kohlenstoff (rechts; n = 42 Standorte)

Pro Standort und Erhebung sind für das Raumgewicht und den Wassergehalt jeweils die Mittelwerte aus vier Humax-Volumenproben (0–20 cm) dargestellt, für den Kohlenstoffgehalt der Mittelwert der vier Flächenmischproben. Die Linien verbinden jeweils die beiden Messungen desselben Standortes.



## 5 > Nährstoffe

---

Die Düngung ist in der Pflanzenproduktion ein wichtiger Faktor: Sie ermöglicht überhaupt erst die hohen Ernteerträge, die für die Ernährung von Mensch und Nutztier notwendig sind.

Die mengenmässig wichtigsten Nährstoffe in der Pflanzenproduktion sind Stickstoff, Phosphor und Kalium. Gemäss Spiess (2011) betrug der durchschnittliche Eintrag auf die landwirtschaftliche Nutzfläche der Schweiz im Jahr 2008 etwa 150 kg/ha für Stickstoff, 13,5 kg/ha für Phosphor und 38 kg/ha für Kalium. Abzüglich der Ernteerträge resultieren im Mittel Nährstoffüberschüsse von 108 kg/ha für Stickstoff, 5,5 kg/ha für Phosphor und 28 kg/ha für Kalium. Auf die gesamte landwirtschaftliche Nutzfläche der Schweiz hochgerechnet betragen die Nährstoffüberschüsse auf die landwirtschaftlich genutzten Böden pro Jahr 114 000 t Stickstoff, 5800 t Phosphor und 29 400 t Kalium. Diese Bilanzen stellen jedoch mittlere Verhältnisse dar, ungeachtet des Betriebstyps, der Bewirtschaftung und der Kulturen. Für einzelne Parzellen im NABO-Messnetz können daher die Nährstoffbilanzen stark von der nationalen mittleren Bilanz abweichen.

Für 16 ausgesuchte Acker- und Graslandstandorte des NABO-Messnetzes wurden im Jahr 2011 getrocknete Bodenproben aus dem Archiv auf ihre Nährstoffgehalte untersucht. Die Bodenproben der 1. bis 5. Erhebung wurden zeitgleich im Labor analysiert. Die Standorte wurden so ausgewählt, dass sie im Messnetz des indirekten Monitorings enthalten sind und eine breite Variation in Bezug auf die Betriebsausrichtung, das Düngungsregime, die Nutzungsintensität und die Standortbedingungen abdecken. In den Abb. 29 und Abb. 30 sind die absoluten zeitlichen Veränderungen für Stickstoff, Phosphor (beides Totalgehalte) und Kalium (pflanzenverfügbar; extrahiert mit Ammoniumacetat-EDTA) in den Böden von Grasland- und Ackerbauparzellen dargestellt.

**Abb. 28 > NABO-Probenahme auf einem Gemüsefeld bei San Antonino TI**



## 5.1 Grasland

Die Nährstoffgehalte in den Oberböden der neun Graslandparzellen waren generell relativ hoch (Abb. 29). Die Bodenproben der 5. Erhebung wiesen Gesamtgehalte an Phosphor zwischen 0,9 und 2,1 g pro kg Feinerde auf (Mittelwert 1,3 g/kg); die totalen Stickstoffkonzentrationen lagen zwischen 3,1 und 6,4 g/kg (Mittelwert 4,5 g/kg), die Kaliumkonzentrationen zwischen 49 und 441 mg/kg (Mittelwert 201 mg/kg). Interessanterweise wiesen auch jene drei Standorte hohe Nährstoffgehalte auf, die seit Beginn der Zeitreihe Mitte der 1980er-Jahre als wenig intensiv eingestuft werden. Mit grosser Wahrscheinlichkeit wurden diese Graslandparzellen früher intensiv genutzt und erhielten hohe Düngergaben.

Die gemessenen Veränderungen der Nährstoffgehalte waren insgesamt beträchtlich. Gegenläufige zeitliche Muster wurden vor allem zwischen den sechs intensiven und den drei wenig intensiven Graslandstandorten festgestellt. Letztere wiesen im Mittel über die zwei Jahrzehnte eine Abnahme um 0,12 g Phosphor und 0,14 g Stickstoff pro kg Feinerde auf, während bei ersteren im Mittel die Phosphorgehalte im Oberboden um 0,12 g/kg und diejenigen für Stickstoff um 0,58 g/kg anstiegen. Auf Basis der gemessenen Raumgewichte dieser Böden betrug die Vorratsveränderungen für Phosphor und Stickstoff in 20 Jahren somit -221 kg/ha bzw. -255 kg/ha für die wenig intensiv bewirtschafteten Standorte und +218 kg/ha bzw. +1042 kg/ha für die intensiv bewirtschafteten. Für Kalium wurden vereinzelt grosse zeitliche Schwankungen festgestellt. Insgesamt zeigten die beprobten Graslandstandorte eine Zunahme von Kalium um 101 mg/kg im Oberboden (Vorratsänderung 223 kg/ha). Die Graslandstandorte erhielten überwiegend Düngergaben mit Rindergülle, Rindermist und teils Misch- oder Schweinegülle. Mineraldünger wurde in keinem der Fälle ausgebracht.

Die Stickstoff- und Phosphorgehalte im Boden der intensiv genutzten Graslandstandorte haben bis Ende der 1990er-Jahre tendenziell zugenommen und sich dann auf einem bestimmten Niveau eingependelt. Der gestoppte Anstieg könnte mit der Einführung des ökologischen Leistungsnachweises (ÖLN) Mitte der 1990er-Jahre zusammenhängen. Um in den Genuss von Direktzahlungen zu kommen, ist seither eine gesamtbetrieblich ausgeglichene Nährstoffbilanz erforderlich. Für Kalium hingegen stiegen die Gehalte im Oberboden für die meisten untersuchten Graslandstandorte weiter an. Um diese Hypothesen umfassend prüfen zu können, werden gegenwärtig die Nährstoffgehalte aller rund 70 landwirtschaftlich genutzten Standorte im NABO-Messnetz analysiert.

## 5.2 Ackerbau

Die sieben Ackerbauparzellen zeigen für Stickstoff und Phosphor unterschiedliche Tendenzen (Abb. 30). Beim Stickstoffgehalt ist über die ersten zehn Jahre eine leichte Abnahme ersichtlich, gefolgt von einer leichten Zunahme. Dasselbe Muster wurde auch beim organischen Kohlenstoffgehalt beobachtet (vgl. Kapitel 4.2). Rund 98 % des Stickstoffes im Boden sind in der organischen Substanz enthalten (Gisi et al. 1997), die gefundenen Parallelen entsprechen somit den Erwartungen. Im Gegensatz dazu zeigen die Phosphorgehalte für Ackerstandorte dieselben Tendenzen wie intensiv genutzte

Graslandstandorte: zunehmende Gehalte während der ersten zehn Jahre, gefolgt von einer Stabilisierung. Beim pflanzenverfügbaren Kalium sind bei einigen Standorten starke Schwankungen erkennbar, insgesamt jedoch keine Veränderungen über den betrachteten Zeitraum.

Der mittlere Phosphorgehalt lag bei 1,2 g pro kg Feinerde (Bereich 0,7–1,9 g/kg), der mittlere Stickstoffgehalt bei 4,6 g/kg (1,3–11,5 g/kg) und der mittlere Kaliumgehalt bei 270 mg/kg (59–761 mg/kg). Die zeitlichen Veränderungen der Phosphorgehalte der einzelnen Standorte schwankten in der betrachteten Zeitperiode zwischen Abnahmen von 0,1 g/kg (entspricht einer Vorratsänderung von -218 kg/ha) und Zunahmen von 0,15 g/kg (+327 kg/ha). Die gleichen Kennwerte betragen für Stickstoff -0,2 g/kg (-330 kg/ha) und +0,3 g/kg (719 kg/ha), für Kalium -89 mg/kg (-196 kg/ha) und 118 mg/kg (259 kg/ha).

### 5.3 Handlungsempfehlungen ableiten

Mit dem geplanten Vergleich des direkten und indirekten Monitorings werden in Zukunft Bewirtschaftungsmassnahmen identifiziert werden können, die unter Berücksichtigung von Düngungsregime, Fruchtfolge bzw. Nutzungsintensität sowie Bodeneigenschaften zu einer Anreicherung oder einer Abnahme von Nährstoffen im Boden führen. Aus den Resultaten können präventive Handlungsempfehlungen abgeleitet werden.

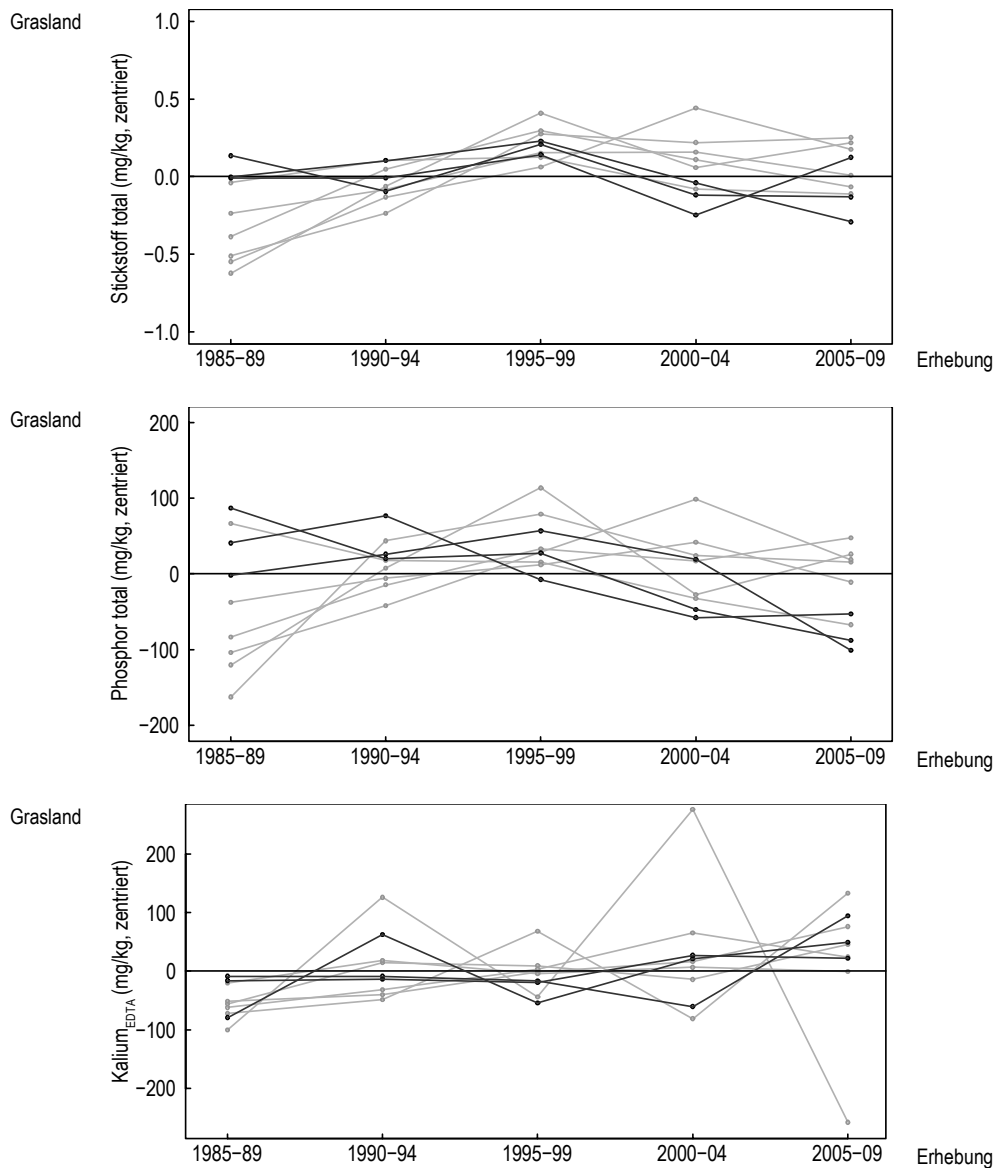
Im schweizerischen Bundesrecht befassen sich mehrere Vorschriften mit Düngern und Düngung. Eine Zusammenfassung und Interpretationshilfe findet sich in Dettwiler et al. (2006). Die aktuellen gesetzlichen Grundlagen zur Verwendung von Düngern sind in der Publikation «Nährstoffe und Verwendung von Düngern in der Landwirtschaft» zusammengefasst (BAFU & BLW 2012). Darin wurden auch Bestimmungen zur Nährstoffbilanz und zu Nährstoffgrenzwerten konkretisiert. Für das NABO-Messnetz gilt es, die Nährstoffanalysen der landwirtschaftlich genutzten NABO-Parzellen auszubauen (inklusive der Alpweiden).

Während Phosphor und Kalium vor allem mit Düngemitteln eingebracht werden, sind für Stickstoff die Fixierung durch Leguminosen und die Deposition aus der Luft zusätzliche bedeutende Eintragspfade. Hauptquellen sind die Freisetzung von Ammoniak aus der Landwirtschaft und von Stickoxiden aus Verbrennungsprozessen (z. B. Verkehr). Die erhöhten Stickstoffeinträge bewirken in der Regel im Boden eine Versauerung, insbesondere bei Böden mit geringer Pufferkapazität.

Nach den aktuellen Prognosen der Stickstoffflüsse in der Schweiz (Heldstab et al. 2010; 2013) sind bis 2020 insgesamt keine nennenswerten Reduktionen der Stickstoffeinträge in Böden zu erwarten. Es wird zwar von einer Abnahme der Mineraldüngerimporte und der Luftemissionen durch die Landwirtschaft ausgegangen, jedoch auch von einem zunehmenden Import an Futtermitteln und steigenden Hofdüngermengen. Daten zu den Stickstoffgehalten von NABO-Parzellen in Kombination mit weiteren Bodeneigenschaften, wie dem Säuregrad, der Basensättigung und der organischen Substanz, sind daher wichtige Ergänzungen bei der Bodenbeobachtung.

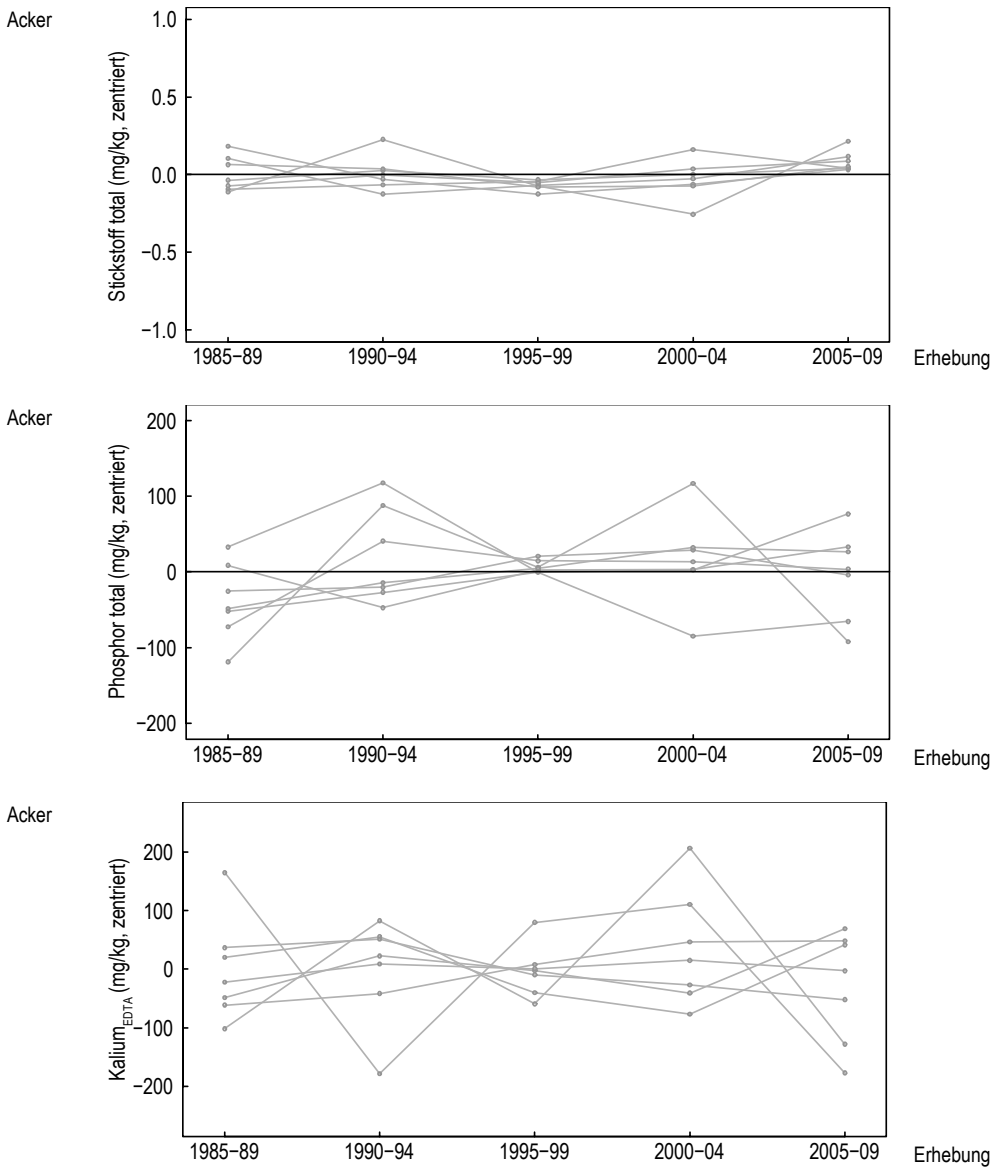
**Abb. 29** > Gehalte im Oberboden (0–20 cm, zentriert auf den jeweiligen Mittelwert der Parzelle) von neun Graslandparzellen für Stickstoff ( $N_{\text{tot}}$ ), Phosphor ( $P_{\text{tot}}$ ) und Kalium ( $K_{\text{EDTA}}$ )

Helle Linien: intensiv genutzt ( $n=6$ ); dunkle Linien: extensiv genutzt ( $n=3$ ).



**Abb. 30** > Gehalte im Oberboden (0–20 cm, zentriert auf den jeweiligen Mittelwert der Parzelle) von sieben Ackerbauparzellen für Stickstoff ( $N_{\text{tot}}$ ), Phosphor ( $P_{\text{tot}}$ ) und Kalium ( $K_{\text{EDTA}}$ )

*Helle Linien: intensiv genutzt (n=6); dunkle Linien: extensiv genutzt (n=3).*



## 6 > Rasterbeprobung an Standorten des Biodiversitätsmonitorings Schweiz

---

Das Biodiversitäts-Monitoring Schweiz (BDM; Koordinationsstelle Biodiversitäts-Monitoring Schweiz 2009) erfasst seit einigen Jahren die biologische Vielfalt anhand verschiedener Indikatoren. Für den Zustandsindikator Z9 «Artenvielfalt in Lebensräumen» bestimmen Fachleute Gefässpflanzen-, Moos- und Gehäuseschneckenarten auf rund 1600 Stichprobenflächen, die im ganzen Land regelmässig verteilt sind. Seit 2011 nehmen die Probenehmer im Auftrag der NABO an den Standorten des Indikators Z9 zusätzlich je vier volumetrische Bodenproben in 0–20 cm Tiefe. Die Bodenproben werden durch die NABO aufbereitet (getrocknet und gesiebt) und archiviert. Bei einer ersten Analysenrunde werden pH-Wert (Säuregrad) sowie die totalen Gehalte an Kohlenstoff und Stickstoff bestimmt. Aufgrund der volumetrischen Probenahme können das Raumgewicht der Feinerde und damit volumenbezogen Gehalte bzw. Vorräte (z. B. Kohlenstoffvorräte) der obersten 20 cm des Bodens berechnet werden. Derzeit liegen Resultate für 40 % aller Z9-Standorte vor.

Die Beprobung der Standorte ist eine Querschnittsuntersuchung. Das bedeutet, es können Aussagen über den aktuellen Zustand der Böden der Schweiz gemacht werden, nicht jedoch über deren zeitliche Entwicklung. Als erstes Ergebnis dieser interessanten Zusammenarbeit werden hier die Säuregrade an rund 700 Standorten des Indikators Z9 sowie an den NABO-Standorten dargestellt (Abb. 31).

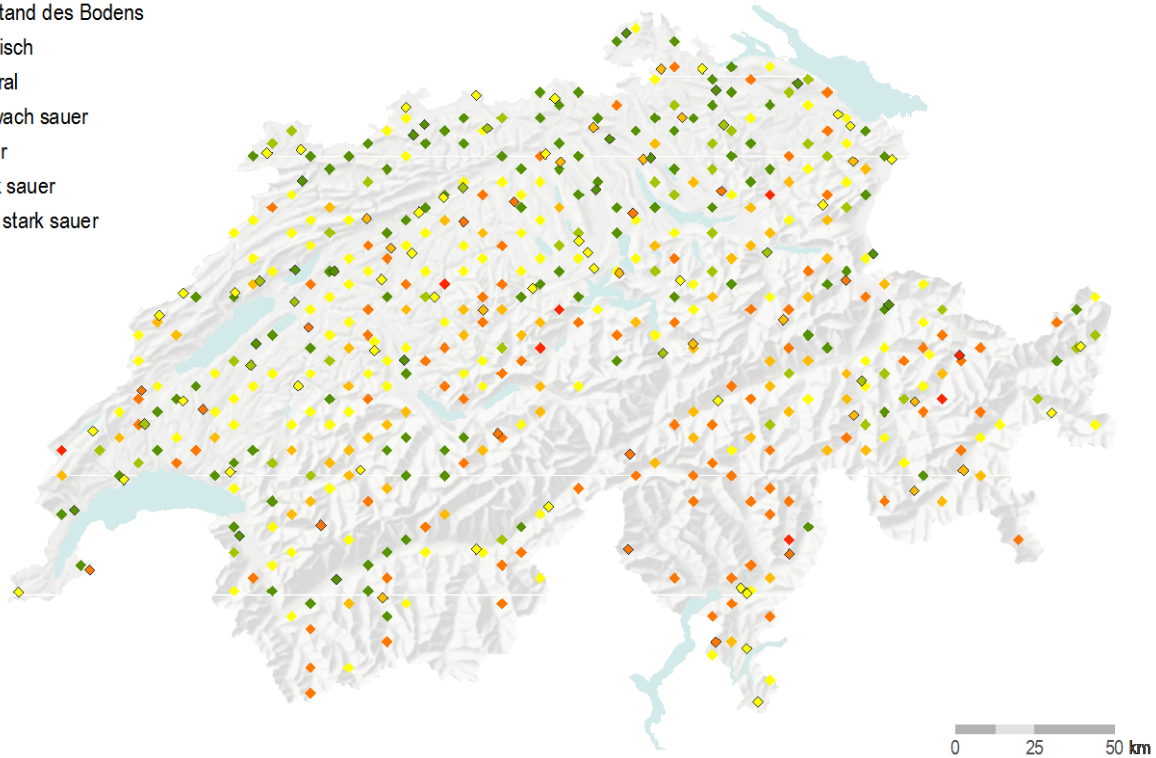
Die Einteilung in alkalische bis saure Böden erfolgt aufgrund des pH-Wertes des Bodens. Der Säuregrad ist eine der wichtigsten Bodeneigenschaften: Er hat grossen Einfluss auf die bodenbiologische Aktivität, auf die Verfügbarkeit von Nährstoffen und die Mobilität von Schadstoffen. Unter sauren Bedingungen ist die biologische Aktivität gehemmt, und es kommt zu einer Anreicherung von organischer Substanz. Gleichzeitig werden Schwermetalle weniger stark gebunden und können in tiefere Bodenhorizonte verlagert werden. Deshalb ist der Säuregrad des Bodens eine wichtige Kenngrösse bei der Beurteilung der gemessenen Schwermetallgehalte.

Der Säurezustand des Bodens zeigt deutliche geographische Muster. Neutrale bis alkalische Bedingungen sind gehäuft im Norden und Nordosten der Schweiz zu finden. Ebenso existieren in den Alpen einige kleinere Gebiete mit neutralen bis alkalischen Bedingungen. Im Mittelland dominieren Böden mit leicht sauren Bedingungen. Hier ist zu beachten, dass der Säurezustand durch die landwirtschaftliche Nutzung beeinflusst wird, beispielsweise aufgrund der Düngung mit Kalk. Stark bis sehr stark saure Böden sind vorwiegend in den Alpen, entlang der Voralpen sowie auf der Alpensüdseite, vereinzelt auch im Jura anzutreffen.

**Abb. 31** > Säurezustand des Bodens: Zwischenresultate 2011 bis 2012 des BDM-NABO-Synergieprojektes (40 % der Z9-Standorte), ergänzt mit den Standorten der NABO-Dauerbeobachtung (Symbole mit schwarzem Rand)

Säurezustand des Bodens

- ◆ alkalisch
- ◆ neutral
- ◆ schwach sauer
- ◆ sauer
- ◆ stark sauer
- ◆ sehr stark sauer





## 7 > Folgerungen

---

Seit mehr als 20 Jahren erfasst die Nationale Bodenbeobachtung (NABO) mit ihrem Messnetz die Schwermetallbelastung der Schweizer Böden. Mit dem erfolgreichen Abschluss der 5. Erhebung (2004 bis 2009) liegt nun ein gut dokumentiertes Bodenprobenarchiv vor, das retrospektiv für viele Fragestellungen genutzt werden kann. Der vorliegende Bericht geht primär auf wichtige chemische Eigenschaften der Böden ein. In Kombination mit biologischen und physikalischen Bodenkenngrössen sowie der Prozessmodellierung sind zukünftig weitere Erkenntnisse zur Entwicklung der Bodenqualität zu erwarten. Somit sollte der Wert der NABO und ihres Messnetzes auch unabhängig der jeweils untersuchten Bodeneigenschaften gesehen werden. In den 1980er-Jahren hätte wohl niemand vermutet, dass der Boden als Kohlenstoffspeicher ins Zentrum rücken wird. Wir wissen heute nicht, was die zentrale Fragestellung in zwei Jahrzehnten sein wird. Eine wichtige Aufgabe der NABO ist es daher, zukünftigen Generationen ein gut dokumentiertes und konsistentes Archiv an Bodenproben zu übergeben.

### 7.1 Erfolgskontrolle umweltpolitischer Massnahmen

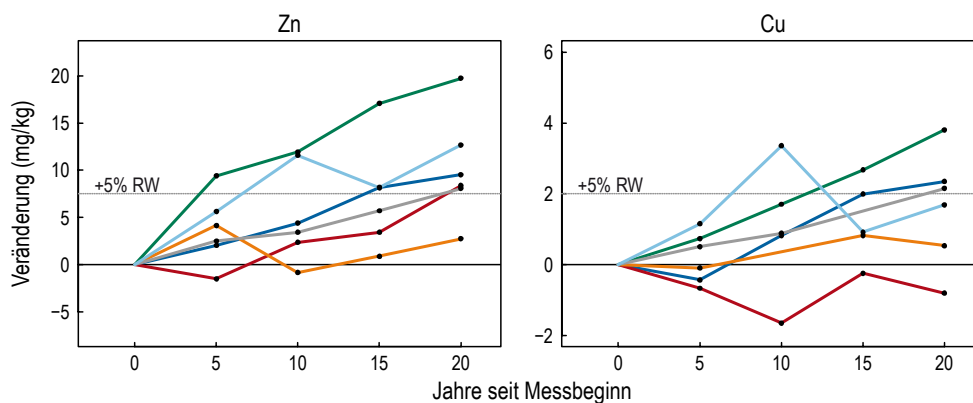
Die Resultate des vorliegenden Berichtes zeigen: Das Messnetz der NABO und das Konzept zur Probenahme, Probenaufbereitung und Archivierung der Bodenproben erfüllen die Erwartungen an eine zuverlässige Bodenbeobachtung zur Früherkennung von Bodenveränderungen. Die NABO ist in der Lage, zeitliche Trends bei wichtigen chemischen Bodeneigenschaften zuverlässig zu erkennen. Dies gilt für die Schwermetallgehalte, welche beim vorliegenden Bericht im Fokus standen, aber auch für andere Eigenschaften wie die Gehalte an organischem Kohlenstoff oder wichtigen Pflanzennährstoffen. Bei den Schwermetallgehalten werden Veränderungen ab 5 % des jeweiligen Richtwertes mit grosser Sicherheit festgestellt. In den meisten Fällen sind bereits kleinere Veränderungen erkennbar. Für den Vollzug können so frühzeitig präventive Massnahmen vorgeschlagen werden. Gleichzeitig ist die Erfolgskontrolle politischer Massnahmen gewährleistet.

### 7.2 Handlungsbedarf bei Zink und Kupfer

Als Mitte der 1980er-Jahre die NABO geplant wurde, stand die Verschmutzung der Böden durch Immissionen aus der Luft im Zentrum der Umweltpolitik. Die entsprechenden technischen Massnahmen (strengere Vorschriften bei der Luftreinhaltung, Verbannung von bleihaltigem Benzin) haben in den letzten zwei Jahrzehnten ihre Wirkung gezeigt. Die Resultate in Kapitel 3.4 belegen dies. Der Eintrag von Schwermetallen aus der Luft scheint in der Schweiz heute kein Problem mehr zu sein. Allerdings sind die Depositionen anderer Stoffe wie Stickstoff nach wie vor auf unverändert hohem Niveau, was zu einer zunehmenden Versauerung der Böden führt.

Keine Entwarnung kann bei den Zink- und Kupfereinträgen aus Hofdünger (Gülle und Mist) gegeben werden. Wie bereits in früheren Berichten aufgezeigt wurde (Desaules et al. 2006; Meuli et al. 2014), nehmen die Gehalte an Zink und Kupfer in Böden unter intensiv genutztem Grasland kontinuierlich zu. Die Zunahmen gingen auch während der letzten fünf Jahre unvermindert weiter. Zudem konnte teilweise auch auf Ackerstandorten, auf welchen Hofdünger ausgebracht wurde, entsprechende Zunahmen beobachtet werden. Die Schwermetallbilanzen für NABO-Standorte (indirektes Monitoring; Keller et al. 2005) zeigen, dass die Ursache für die beobachteten Zunahmen eindeutig beim Hofdünger liegt. Gülle wie auch Mist enthalten je nach Bewirtschaftung beträchtliche Mengen an Zink und Kupfer (Della Peruta 2013). Diese gelangen hauptsächlich als Zusatzstoffe im Tierfutter in den Düngerkreislauf. Als weitere Quelle kommen Desinfektionsmittel, welche im Stall eingesetzt werden, in Frage.

**Abb. 32** > Veränderung der Zn- und Cu-Gehalte unter intensiv genutztem Grasland im NABO-Messnetz



Die Gehalte an Zink und Kupfer unter intensivem Grasland nahmen über einen Zeitraum von 20 Jahren um 5 bis 10 % des Richtwertes zu (Abb. 32). Kontinuierliche Zunahmen dieser Grössenordnung widersprechen der langfristigen Erhaltung der Bodenfruchtbarkeit, wie sie durch Artikel 33 des Umweltschutzgesetzes (USG 1983) gefordert wird. In solchen Fällen müssen die Kantone im Einvernehmen mit dem Bund Massnahmen ergreifen (Art. 34 Abs. 1 USG). Laut Artikel 8 der Verordnung über Belastungen des Bodens (VBBo 1998) müssen die Kantone die Ursachen abklären und Massnahmen prüfen, wenn die Bodenbelastung deutlich ansteigt, selbst wenn die aktuellen Gehalte (noch) unterhalb des Richtwertes liegen.

Der Einsatz von Hofdünger ist ökologisch sinnvoll, weil Ressourcen effizient genutzt werden. Die Düngung mit Gülle und Mist schliesst die Kreisläufe für Stickstoff, Phosphor und weitere Nährstoffe. Allerdings ist anzustreben, die Einträge von Zink und Kupfer in diesen Kreislauf zu reduzieren.

Die Einträge von Zink und Kupfer in Böden via Hofdünger variieren sehr stark aufgrund der unterschiedlichen Fütterung der Tiere (Reutimann 2006). Für Futterzusatzstoffe gibt es einerseits rechtlich verbindliche Höchstgehalte, die in der Futtermittelbuch-Verordnung festgelegt sind (FMBV 2011). Andererseits veröffentlicht die For-

schungsanstalt Agroscope Fütterungsempfehlungen für Schweine und Wiederkäuer. Diese Empfehlungen basieren auf wissenschaftlichen Grundlagen und liegen alle deutlich (Faktor 2 bis 30) unterhalb der erlaubten Höchstgehalte. Die Analysen von Reutimann (2006) ergaben, dass die Zufuhr an Zink und Kupfer bei Schweinen und Rindvieh in der Regel über den Empfehlungen liegt. Es ist also anzunehmen, dass die Mengen an Zink und Kupfer im Tierfutter ohne negative Effekte für Tiere und Landwirte deutlich reduziert werden könnten.

### 7.3 **Veränderungen beim organischen Kohlenstoff**

Zwischen Boden, Atmosphäre, Hydrosphäre und Biosphäre gibt es enge Wechselwirkungen. So besitzen Böden im Stoff- und Wasserhaushalt der Ökosysteme eine wichtige Kopplungsfunktion. Prognosen gehen davon aus, dass der Klimawandel vielerorts zu abnehmenden Kohlenstoffgehalten in Böden führt. Konsistente und zuverlässige Zeitreihen der Kohlenstoffgehalte, wie sie in der NABO aufgebaut werden, sind daher eine wichtige Basis für (politische) Entscheidungen.

Die Kohlenstoffgehalte in den Böden der Graslandstandorte haben bis Ende der 1990er-Jahre leicht zugenommen. Seither sind diese entweder leicht gesunken oder gleich geblieben. Die gemessenen Veränderungen sind allerdings insgesamt nur sehr gering (weniger als ein halbes Prozent). Zusammen mit den gemessenen Nährstoffgehalten und dem Düngungsregime der Standorte können diese Veränderungen integral beurteilt und mit der Bewirtschaftung und Nutzungsintensität der Parzellen in Beziehung gesetzt werden. Im Gegensatz zum Ackerland konnten für die Grasland- und Waldstandorte keine zeitlichen Trends der Kohlenstoffgehalte festgestellt werden.

Die Zuverlässigkeit der Zeitreihen wird in Zukunft weiter optimiert: Mit zusätzlich erhobenen Parametern (Raumgewicht und Wassergehalt) lassen sich methodische Fehler korrigieren. Gemessene zeitliche Veränderungen von Kohlenstoffgehalten in Böden können somit in die effektiven Veränderungen (Signal mit Ursachenanalyse) und in zufällige und methodische Fehler (Grundrauschen) separiert werden. Die Ergebnisse zu den Kohlenstoffgehalten im Boden fließen in das Nationale Treibhausgasinventar ein und erlauben fundierte Aussagen zum Vollzug und zu politischen Entscheidungen.

### 7.4 **Nährstoffeinträge auf hohem Niveau stabilisiert**

Mit dem geplanten Vergleich des direkten und indirekten Monitorings können nicht-nachhaltige Bewirtschaftungsmassnahmen identifiziert werden, die unter Berücksichtigung von Düngungsregime, Fruchtfolge, Nutzungsintensität und Bodeneigenschaften effektiv zu einer Anreicherung oder Abnahme von Nährstoffen im Boden führen. Dies ermöglicht es, präventive Handlungsempfehlungen abzuleiten und die gemessenen Veränderungen der Gehalte in den Böden in den Kontext der Bewirtschaftung zu stellen.

---

Die Veränderungen der Gehalte an Stickstoff und Phosphor (beide als Totalgehalte) sowie an Kalium (Ammoniumacetat-EDTA-Extraktion) in den Böden der Graslandstandorte waren insgesamt beträchtlich; diejenigen der Ackerparzellen zeigten dagegen keine nennenswerten Tendenzen über die zwei Jahrzehnte.

Für die intensiv genutzten Wiesen und Weiden konnten im Vergleich zu den wenig intensiv genutzten Graslandstandorten gegenläufige zeitliche Muster nachgewiesen werden. Im intensiv genutzten Grünland wurde tendenziell eine Zunahme der Stickstoff- und Phosphorgehalte seit dem Beginn der Messreihe bis Ende der 1990er-Jahre festgestellt. Im vergangenen Jahrzehnt blieben die Gehalte dieser Hauptnährstoffe im Boden dagegen auf dem gleichen Niveau. Die Kaliumgehalte stiegen hingegen für die Mehrheit der untersuchten Graslandstandorte über die ganze Messperiode kontinuierlich an. Ob dieser Befund für Stickstoff und Phosphor mit der Einführung des ökologischen Leistungsnachweises (ÖLN) Mitte der 1990er-Jahre in Verbindung gebracht werden kann, wird mit der Untersuchung der Nährstoffgehalte aller rund 70 landwirtschaftlich genutzten Standorte im NABO-Messnetz breiter abgestützt. Dies gilt ebenso für die Zunahmen der Kaliumgehalte auf den Graslandstandorten.

Die Nährstoffanalysen der landwirtschaftlich genutzten NABO-Parzellen (inklusive Alpweiden) werden weiter ausgebaut. Angesichts der aktuellen Prognosen zu den Stickstoffflüssen in der Schweiz – mittelfristig ist keine nennenswerte Reduktion der Stickstoffeinträge in Böden zu erwarten – gilt es, diese Problematik mit der Messung geeigneter Bodeneigenschaften (beispielsweise der Basensättigung) zu verfolgen.

## 8 > Ausblick

---

Ein Hauptziel des NABO-Messnetzes ist die Erfassung von Veränderungen der Bodenqualität. Schädliche Entwicklungen sollen frühzeitig erkannt werden, damit Massnahmen zur Gefahrenabwehr ergriffen und die Bedingungen für eine nachhaltige Bodennutzung geschaffen werden können. Um diesen Auftrag in Zukunft noch besser zu erfüllen, wird das bewährte Konzept des NABO-Messnetzes hinsichtlich Probenahme, Standortauswahl und Messprogramm stufenweise optimiert. Eine grosse Herausforderung besteht darin, das Messnetz nicht zu sehr auf ein bestimmtes Ziel oder eine bestimmte Fragestellung auszurichten. Heute kann niemand vorhersagen, welche Fragen in 10 oder 20 Jahren aktuell sein werden. Das Messnetz sollte daher auf möglichst viele Fragestellungen zur zeitlichen Veränderung der Bodenqualität Antworten liefern können.

Gleichzeitig soll die Synthese der Resultate aus direktem und indirektem Monitoring forciert werden, um jene relevanten Prozesse im Boden, die zeitliche Veränderungen von Bodeneigenschaften verursachen, noch besser zu verstehen. Zusatzuntersuchungen sollen dabei regionale bis landesweite Auswertungen für einzelne Parameter ermöglichen.

### 8.1 Anpassung des Messnetzes und des Messprogramms

Stand in den 1980er-Jahren die Belastung der Böden durch Schwermetalle im Vordergrund, sind im Verlauf der letzten Jahre neue Fragestellungen hinzugekommen. Diese widerspiegeln die veränderte gesellschaftliche Wahrnehmung des Bodens, der heute als wichtige Schnittstelle der verschiedenen Ökosysteme betrachtet wird. Seine Rolle als Speicher- und Puffermedium im Kontext des Klimawandels wurde beispielsweise lange Zeit nicht erkannt. Heute und in Zukunft werden für die wissenschaftsbasierte Politikberatung dringend zuverlässige Zeitreihen von Kohlenstoffgehalten in Böden benötigt.

Zu den Fragestellungen, die in den Vordergrund gerückt sind, gehören auch Veränderungen der Biodiversität, Veränderungen des Wasserhaushaltes und damit der Bodenfeuchte durch den Klimawandel, Bodenverdichtung, aber auch die Auswirkungen veränderter Bodeneigenschaften auf die Naturgefahrenprävention. Mit der im NABO-Messnetz gegebenen Kombination von Standortfaktoren wie Bodentyp, Geologie, Nutzung, Höhenstufe und Klima lassen sich jedoch nicht alle neuen Fragestellungen ausreichend beantworten. Mit der Überarbeitung des Standortkonzeptes sollen deshalb bestehende geographische und standörtliche Lücken geschlossen werden. Zur Analyse der Auswirkungen des Klimawandels auf den Boden sind beispielsweise zusätzliche Standorte auf unterschiedlichen Höhen in den Alpen und im Jura notwendig. Da die Berggebiete nach dem gegenwärtigen Kenntnisstand stärker vom Klimawandel betroffen sein werden, sind dort weiterreichende Veränderungen des Humus- und Wasserhaushaltes der Böden zu erwarten.

**Abb. 33** > Bohrkerne (0 bis 40 cm Tiefe) mit Bezeichnungen der Bodenhorizonte für die Graslandstandorte Entlebuch (intensiv genutzt; links) und Elm (extensiv genutzt)

Die Bohrkerne wurden im Rahmen der Fünfterhebung mit Schlagsonden entnommen.



## 8.2 Synthese direktes/indirektes Monitoring

Eine immer grössere Bedeutung gewinnt die Zusammenführung der Resultate des Messnetzes (direktes Monitoring) und des indirekten Monitorings. Beim indirekten Monitoring werden aufgrund von Bewirtschaftungsdaten Stoffbilanzen für etwa 50 der 70 landwirtschaftlich genutzten NABO-Standorte berechnet.

Die Synthese der Daten beider Monitoringinstrumente ist aufwändig, da die Daten sehr umfangreich sind und für viele NABO-Standorte spezifische Besonderheiten beachtet werden müssen. Mit der Synthese sollen die Resultate des Messnetzes verstärkt in den Kontext der Landnutzung gestellt und die Ursachen für die nachgewiesenen zeitlichen Veränderungen identifiziert werden.

Umgekehrt sind die Messresultate des direkten Monitorings wichtige Mosaiksteine, um den Einfluss von Bodenprozessen auf den zeitlichen Verlauf von Bodeneigenschaften besser zu verstehen. Dadurch kann das Verständnis zeitlicher Veränderungen im Boden verbessert und eine nachhaltige Nutzung des Bodens bezüglich Bodeneigenschaften, Bodennutzung und der jeweiligen Bodenbewirtschaftung postuliert werden. Dies gilt sowohl für Schadstoffe als auch für Nährstoffe und den Humusgehalt im Boden.

### 8.3 Regionale bis landesweite Zustände

Der dritte wichtige Bereich ist die Darstellung von regionalen bis landesweiten Zuständen und Szenarien. Dafür werden als Ergänzung zu den Daten der NABO-Standorte zusätzliche Punkt- und Flächendaten benötigt. Diese können von kantonalen Erhebungen oder aus der Zusammenarbeit der NABO mit anderen Monitoringprogrammen stammen. Derzeit arbeitet die NABO mit dem Biodiversitäts-Monitoring (BDM; Koordinationsstelle Biodiversitäts-Monitoring Schweiz 2009) zusammen (vgl. Kapitel 6). An den Probenahmestellen des Zustandsindikators Z9 werden zusätzlich Bodenproben entnommen und durch die NABO aufbereitet. Nach Abschluss des fünfjährigen Probenahmezyklus wird die Schweiz flächendeckend auf einem Raster von 4x6 km beprobt sein. Diese Dichte an Bodenproben ist für die Schweiz ein Novum. Die zentrale Probenaufbereitung maximiert die überkantonale Vergleichbarkeit der Daten. Zudem entsteht ein äusserst wertvoller Datensatz, weil für jeden Standort auch Informationen zur Biodiversität und den Standorteigenschaften vorliegen.

## > Anhang

### A1 Details zu den Methoden

#### A1-1 Beprobung

Die Standorte des NABO-Messnetzes werden in Abständen von fünf Jahren beprobt. Zwischen 1985 und 2009 wurden fünf Erhebungen durchgeführt. Die Ortung der einzelnen Dauerbeobachtungsflächen wird durch das Einmessen anhand von Fixpunkten im Gelände, durch eingegrabene Magnete sowie GPS-Daten garantiert. An einigen wenigen Standorten musste die Fläche während der letzten 20 Jahre verschoben werden, beispielsweise weil auf der ursprünglichen Fläche Fremdmaterial abgelagert wurde.

An jedem Standort werden auf einer Fläche von 10x10 m vier sogenannte Flächenmischproben genommen (Hämman & Desaulles 2003). Dazu wird mit einem Hohlmeisselbohrer (Stahlhalbrohr mit 2,5 cm Innendurchmesser) pro Quadratmeter eine Bodenprobe bis 20 cm Tiefe genommen. Die insgesamt 100 Einzelproben werden anschliessend gemäss Abb. 34 auf die vier Flächenmischproben verteilt. Zusätzlich wird eine fünfte Mischprobe à 25 Einstichen genommen, welche direkt nach der Probenahme (d. h. ohne Aufbereitung) eingefroren wird.

Bodeneigenschaften können innerhalb einer Fläche von 100 m<sup>2</sup> stark variieren. Da jede Mischprobe aus 25 Einzelproben besteht, gleicht sich die kleinräumige Variabilität aber aus, so dass jede Mischprobe die beprobte Fläche repräsentiert. Die Aufteilung in vier Mischproben erlaubt einerseits eine Beurteilung der Variabilität innerhalb der Probenahmefläche, andererseits ermöglicht sie eine Qualitätskontrolle der gesamten Prozesskette (Probenahme, Probenvorbereitung, Analytik).

Seit der 4. Erhebung (ab 2000) werden den obersten 20 cm des Bodens an jedem Standort zusätzlich vier Volumenproben (Humax) entnommen. Damit bestimmt die NABO das Raumgewicht der Feinerde (d. h. die Menge Feinerde pro Kubikmeter Boden). So können die Konzentrationsangaben (mg/kg Feinerde) der Flächenmischproben in Vorräte (mg/m<sup>3</sup>) umgerechnet werden. Dies ist wichtig, da der Boden je nach Feuchtigkeit schrumpft oder quillt.

Bei der NABO ist man sich bewusst, dass nicht nur die obersten 20 cm des Bodens von Bedeutung sind, sondern auch die darunterliegenden Schichten. Nimmt beispielsweise der Gehalt einer Substanz in den obersten 20 cm ab, ist es wichtig zu wissen, ob diese Substanz tatsächlich verschwunden ist, oder ob sie einfach nach unten verlagert wurde. Bei der 5. Erhebung (2005–2009) wurden deshalb an jedem Standort vier Bohrkern bis in eine Tiefe von 40 cm entnommen. Dazu wurden Schlaghülsen mit 4,8 cm Durchmesser verwendet. Seit Beginn der 6. Erhebung (2010–2014) werden Bohrkern bis zu einer Tiefe von maximal einem Meter genommen. Im Unterschied zu den Flä-



chemischproben wird das Material der Bohrkern nach Bodenhorizonten aufgeteilt und jeweils separat analysiert.

Zur Qualitätssicherung der Probenahme wird ein Journal geführt. Darin werden der Bodenzustand (z. B. Bodenfeuchte), die Wetterbedingungen sowie allfällige Besonderheiten oder Probleme der Probenahme festgehalten. Zudem werden Metadaten wie die aktuelle Bewirtschaftung und Kultur erfasst.

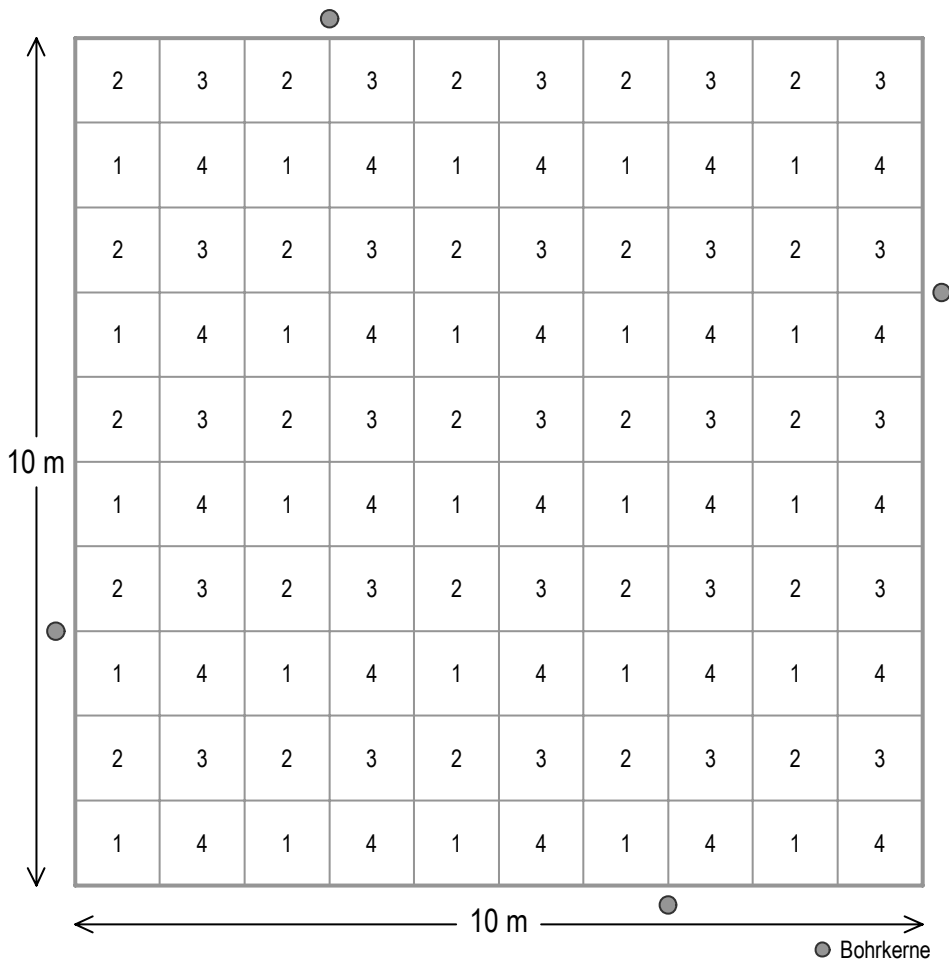
**Tab. 5 > Dauerbeobachtungsstandorte des NABO-Messnetzes**

Nr	Gemeinde / Ort	Kanton	Höhe	Landnutzung	Ersterhebung	Bodentyp
1	Aadorf / Tänikon	TG	537	Grasland, intensiv	1989	Braunerde
2	Zürich / Zürichberg	ZH	668	Mischwald	1989	Braunerde-Pseudogley
3	Payerne / Les Innuardes	VD	488	Ackerbau	1985	Braunerde
4	Conthey / Les Fougères	VS	478	Obstbau	1985	Fluvisol
5	La Neuveville / Schafis	BE	475	Rebbau	1985	Kalkbraunerde
6	Grindelwald / Itramen	BE	1915	Grasland, extensiv	1989	Braunpodsol
7	Oberstammheim / Stammerberg	ZH	581	Mischwald	1989	Braunerde
8	Rothenfluh / Kei	BL	695	Laubwald	1989	Rendzina
9	Binningen / Bruderholz	BL	324	Ackerbau	1985	Parabraunerde
10	Gais	AR	935	Grasland, wenig intensiv	1989	Braunerde-Gley
11	La Sarraz	VD	515	Ackerbau	1985	Braunerde
12	Aristau / Werd	AG	380	Schutzstandort	1989	Fahlgley
13	Wiedlisbach	BE	455	Ackerbau	1985	Braunerde
14	Dübendorf / Stettbach	ZH	440	Ackerbau	1985	Kalkbraunerde
15	Ins / Heumoos	BE	433	Ackerbau	1985	Halbmoor
16	Mühlebach / Schwenni	VS	1220	Grasland, wenig intensiv	1989	Phaeozem
17	Niedermühlern / Uecht	BE	945	Ackerbau	1986	Braunerde
18	Langenthal / Riedhof	BE	525	Mischwald	1989	Parabraunerde
19	Wettingen / Lägern	AG	685	Mischwald	1989	Parabraunerde
20	Roggwil / Esserswil	TG	460	Obstbau	1986	Braunerde
22	Staffelbach / Wiliberg	AG	675	Mischwald	1989	Saure Braunerde
23	Möhlín / Forstzelgli	AG	343	Ackerbau	1986	Parabraunerde
24	Niederlenz / Länzert	AG	387	Laubwald	1989	Parabraunerde
25	Schleitheim / Milten	SH	545	Ackerbau	1986	Braunerde
26	Avully / Champagne	GE	428	Ackerbau	1986	Braunerde
27	Jussy / Les Grands Bois	GE	505	Laubwald	1989	Pseudogley
28	Leuggern / Etwil	AG	465	Ackerbau	1986	Braunerde-Pseudogley
29	Eschenbach / Hööndlen	LU	450	Ackerbau	1986	Braunerde-Gley
30	Ebikon / Dottenberg	LU	635	Grasland, intensiv	1989	Saure Braunerde
31	Coffrane	NE	770	Ackerbau	1986	Braunerde
32	La Brévine / Les Fontenettes	NE	1215	Grasland, extensiv	1989	Braunerde
33	Mollis / Riet	GL	431	Grasland, intensiv	1986	Fahlgley
34	Elm / Ämpächli	GL	1880	Grasland, extensiv	1989	Saure Braunerde

Nr	Gemeinde / Ort	Kanton	Höhe	Landnutzung	Ersterhebung	Bodentyp
35	Le Cerneux-Péquignot	NE	1 093	Grasland, wenig intensiv	1989	Braunerde
36	Hochdorf	LU	500	Ackerbau	1986	Braunerde
37	Ependes	FR	735	Grasland, wenig intensiv	1989	Braunerde
38	Koppigen / Oeschberg	BE	478	Ackerbau	1986	Buntgley
39	Kiesen / Chlinau	BE	534	Ackerbau	1987	Fluvisol
40	St. Cierges	VD	851	Mischwald	1989	Saure Braunerde
41	Kyburg-Buchegg	SO	464	Grasland, wenig intensiv	1989	Braunerde-Gley
42	Galmwald	FR	580	Laubwald	1989	Saure Braunerde
43	Orbe / Chassagne	VD	622	Laubwald	1989	Parabraunerde
44	Henschiken	AG	417	Ackerbau	1987	Parabraunerde
45	Alpthal / Erlenobel	SZ	1 180	Nadelwald	1989	Fahlgley
46	Vallon	FR	439	Ackerbau	1987	Braunerde-Gley
47	Davos / Seehornwald	GR	1 655	Nadelwald	1989	Humus-Eisenpodsol
48	Oberriet / Kriessern	SG	409	Ackerbau	1987	Moor
49	Unterschächen / Breiten	UR	1 100	Grasland, wenig intensiv	1989	Braunerde
50	Realp / Witenwasseren	UR	2 120	Grasland, extensiv	1989	Humus-Eisenpodsol
51	Wartau / Weite	SG	464	Gemüsebau	1987	Fluvisol
52	Krummenau / Wideralp	SG	1 338	Grasland, extensiv	1989	Braunerde
53	Gempen / Stollen	SO	626	Ackerbau	1988	Braunerde
54	Zuzwil	BE	557	Ackerbau	1988	Braunerde
55	Nyon / Changins	VD	440	Rebbau	1988	Kalkbraunerde
56	Trub / Buechsachen	BE	998	Grasland, wenig intensiv	1988	Saure Braunerde
57	St. Stephan	BE	1 030	Grasland, extensiv	1988	Braunerde
58	Mels / Rütliwald	SG	910	Mischwald	1988	Saure Braunerde
59	Dällikon	ZH	425	Gemüsebau	1988	Fahlgley
60	Entlebuch / Ebnet	LU	955	Grasland, intensiv	1988	Buntgley
61	Winterthur	ZH	445	Stadtpark	1988	Braunerde
62	Bettlach / Bettlachstock	SO	1 065	Laubwald	1988	Braunerde
63	Oensingen	SO	450	Ackerbau	1988	Braunerde-Pseudogley
64	Duggingen / Oberäsch	BE	375	Obstbau	1988	Karbonatregosol
65	Cornol	JU	482	Ackerbau	1988	Braunerde
66	St. Ursanne / Haute Côte	JU	540	Laubwald	1988	Rendzina
67	Method	VD	432	Gemüsebau	1988	Moor
68	Etoy	VD	435	Ackerbau	1988	Braunerde
69	Attalens / Rombuet	FR	818	Grasland, intensiv	1988	Braunerde
70	Disentis	GR	1 105	Grasland, wenig intensiv	1988	Braunerde
71	Lohn / Dros	GR	1 818	Grasland, extensiv	1988	Saure Braunerde
72	Bivio	GR	2 118	Grasland, extensiv	1988	Braunerde
73	Alvaneu	GR	1 560	Nadelwald	1988	Regosol
74	Mörschwil / Beggetwil	SG	526	Grasland, intensiv	1988	Pseudogley
75	Zernez / Munt la Schera	GR	2 400	Schutzstandort	1988	Braunerde
76	Sent / Dartòs	GR	1 690	Nadelwald	1988	Braunerde
77	Paspels	GR	830	Ackerbau	1988	Phaeozem

Nr	Gemeinde / Ort	Kanton	Höhe	Landnutzung	Ersterhebung	Bodentyp
78	Igis / Landquart	GR	532	Ackerbau	1988	Humus-Mischgesteinsboden
79	Pailly	VD	684	Ackerbau	1988	Braunerde
80	Chevèze	JU	538	Ackerbau	1988	Braunerde
81	Gsteig / Heitibüel	BE	1355	Nadelwald	1988	Braunerde
82	Kappelen / Stockeren	BE	441	Laubwald	1988	Kalkbraunerde
83	Wald / Bachtel	ZH	1040	Nadelwald	1988	Saure Braunerde
84	Rifferswil / Hagenholz	ZH	597	Schutzstandort	1988	Saures Moor
85	Frauenfeld / Wuer	TG	383	Laubwald	1988	Aue
86	Lützelfüh	BE	618	Ackerbau	1988	Braunerde
87	Klarsreuti	TG	559	Ackerbau	1988	Braunerde
88	L'Abbaye / Grand Bois à Ban	VD	1358	Nadelwald	1988	Rendzina
89	St. Moritz / Mauntschas	GR	1825	Schutzstandort	1988	Saures Moor
90	Sta. Maria / Bosch de Bald	GR	1245	Nadelwald	1988	Braunpodsol
91	Campo / Cimalmotto	TI	1517	Nadelwald	1988	Braunpodsol
92	Novaggio / Cima Pianca	TI	1080	Laubwald	1988	Humus-Eisenpodsol
93	Marthalen / Abist	ZH	405	Laubwald	1988	Braunerde
94	S. Antonino / Magadino	TI	209	Gemüsebau	1988	Braunerde-Gley
95	Coldrerio	TI	336	Ackerbau	1988	Braunerde
96	Gudo / Progero	TI	265	Rebbau	1989	Humus-Eisenpodsol
97	Lugano	TI	273	Stadtspark	1989	Braunerde
98	Erstfeld	UR	455	Grasland, wenig intensiv	1989	Fluvisol
99	Visp / Albulawald	VS	830	Nadelwald	1989	Braunerde
100	St. Martin / Eison	VS	2340	Grasland, extensiv	1989	Eisenpodsol
102	Vouvry	VS	379	Ackerbau	1989	Fluvisol
103	Härkingen	SO	431	Ackerbau	1995	Braunerde-Gley
104	Küssnacht / Seebodenalp	SZ	1025	Grasland, extensiv	1995	Braunerde
105	Neuchâtel / Chaumont	NE	1138	Grasland, extensiv	1995	Rendzina

**Abb. 34** > Schema für die Probenahme der Flächenmischproben 1 bis 4 sowie der vier Bohrkern bis 40 cm Tiefe (Vierterhebung) bzw. bis 1 m Tiefe (ab der Fünfterhebung)



#### A1-2 Probenaufbereitung

Im Labor werden Steine und Fremdstoffe von Hand aussortiert, anschliessend werden die Proben während 48 Stunden bei 40 °C getrocknet. Danach werden die Proben mit einem Backenbrecher zerkleinert. Mithilfe eines Siebes (Maschenweite 2 mm) wird die Feinerde vom Rest getrennt. Die Feinerde (mehrere kg) sowie die aussortierten und abgeseibten Bestandteile werden archiviert. Ein Teil der Feinerde wird für die Laboranalysen verwendet. Falls nötig, wird die Feinerde dazu mit einer Kugelmühle gemahlen.

Die gemessenen Mengen eines (Schad-)Stoffes werden üblicherweise mit dem Gewicht der Trockensubstanz der Feinerde verglichen, um eine Konzentration zu erhalten (z. B. mg/kg). Dazu wird der Restwassergehalt der Feinerde gravimetrisch bestimmt (Trocknung bei 105 °C). Aufgrund der Volumenproben wird das Raumgewicht der Feinerde (RGFE) bestimmt. Dieses beschreibt, welche Menge Feinerde in einem bestimmten Bodenvolumen vorhanden ist:

$$RG_{FE} = \frac{TS_{FE}}{V_{Probe}} = \frac{M_{Probe} - M_{Wasser} - M_{Skelett}}{V_{Probe}}$$

Hierbei bezeichnet  $TS_{FE}$  das Gewicht der Feinderde. Dies ist das Gewicht jener Bodenfraktion, die nach dem Entfernen des Skelettanteils (Bestandteile  $>2$  mm;  $M_{Skelett}$ ) und des Wassers ( $M_{Wasser}$ ) übrig bleibt.  $M_{Probe}$  steht für das Gesamtgewicht der Probe und  $V_{Probe}$  für deren Volumen.

Für weiterführende Angaben zur Probenvorbereitung sei auf die Berichte von Desaulles & Dahinden (2000) sowie Desaulles et al. (2006) verwiesen.

#### A1-3 Analytik

Die Totalgehalte der Schwermetalle Blei, Cadmium, Chrom, Kobalt, Kupfer, Nickel, Quecksilber sowie Zink wurden gemäss der Verordnung über Belastungen des Bodens (VBBo 1998) bestimmt. Diese sieht eine Extraktion mit 2-molarer Salpetersäure ( $HNO_3$ ) vor, wobei das Verhältnis des Gewichts der Bodenprobe zum Lösemittelvolumen 1:10 beträgt. Für den anschliessenden Nachweis der Schwermetalle im Extrakt gibt die VBBo keine bestimmte Methode vor. Die Messungen der letzten Erhebung wurden mit einem Atomemissionsspektrometer mit induktiv gekoppeltem Plasma (ICP-AES) von ARCOS durchgeführt. Einzige Ausnahme ist Quecksilber, welches mittels Kaltdampf-Fluoreszenzspektroskopie gemessen wurde.

In den früheren Erhebungen wurden teilweise andere Geräte verwendet. Für die Interpretation der Zeitreihen spielt es aber keine Rolle, dass unterschiedliche Geräte und Methoden verwendet wurden. Die Referenzierung der Daten (vgl. Anhang A1-4) eliminiert allfällige Unterschiede zwischen den Methoden.

Die Nachweisgrenzen der Schwermetallbestimmungen sind in Tab. 6 zusammengefasst. Generell konnten die Nachweisgrenzen seit der ersten Erhebung deutlich verbessert werden. Einzige Ausnahme ist Cadmium, wo sich die Nachweisgrenze um eine Grössenordnung verschlechterte. Der Grund dafür liegt beim ICP-AES, der seit der 4. Erhebung verwendet wird. Die Nachweisgrenze für Cadmium ist bei diesem höher als bei den früher verwendeten Geräten, dafür sind die Nachweisgrenzen der übrigen Schwermetalle tiefer.

**Tab. 6 > Bestimmungsgrenzen in mg/kg Trockensubstanz**

	Element	Bestimmungsgrenzen (mg/kg) nach Erhebung					Häufige Gehalte (mg/kg) NABO 80 % der gemessenen Werte <sup>1)</sup>
		1985–1989	1990–1994	1995–1999	2000–2004	2005–2009	
	Cd	0,01	0,01	0,01	0,19	0,10	0,11–0,50
	Cu	2,5	2,5	1,0	1,5	0,7	7–41
	Pb	10	10	2,5	2,2	0,93	16–40
	Zn	4,0	4,0	2,5	9,8	2,7	37–98
	Hg	0,005	0,005	0,005	0,075	0,003	0,05–0,18
	Cr	5,5	5,5	0,5	0,4	0,17	15–42
	Ni	5,0	5,0	0,5	1,2	0,12	8–43
	Co	0,1	0,1	0,01	0,4	0,03	3–11

<sup>1)</sup> 10 %- bis 90 %-Perzentile der 5. Erhebung (2005–2009)

Weitere Bodeneigenschaften wurden als Begleitparameter gemessen: Der Säurezustand des Bodens wurde mit dem pH-Wert erfasst, und der Gehalt an organischem Kohlenstoff ( $C_{org}$ ) diente als Indikator für den Humusgehalt. Beide Grössen wurden gemäss den Referenzmethoden nach FAL (1996) bestimmt (pH-Wert: 1:2,5-Suspension von Boden in 0,01-molarer  $CaCl_2$ -Lösung;  $C_{org}$ : Oxidation mit Kaliumdichromat und anschliessende Rücktitration). Für einen kleinen Teil der Proben wurde der Kohlenstoffgehalt im CN-Analyser per Trockenveraschung bestimmt und – falls nötig – anschliessend der Gehalt an anorganischem Kohlenstoff (Kalk) abgezogen. Diese Methode liefert systematisch höhere Gehalte als die Referenzmethode (Faktor ca. 1,15), die Werte wurden daher auf das Messniveau der Referenzmethode korrigiert.

Weitere Kenngrössen wie die Körnung des Bodens und die Kationenaustauschkapazitäten sind für die meisten Standorte für den Zeitpunkt ihrer ersten Beprobung bekannt.

#### A1-4 Referenzierung

Eine der grössten Herausforderungen für das Bodenmonitoring der NABO ist es, sicherzustellen, dass die gemessenen Werte über die Jahrzehnte vergleichbar sind. Austausch und Reparatur von Laborgeräten können zu Schwankungen in den Messresultaten führen. Diese Schwankungen müssen von echten Zu- oder Abnahmen der Schadstoffe unterschieden werden. Die NABO hat deshalb eine Methode entwickelt, mit der neue Messungen auf vergangene Messungen referenziert werden können.

Die Referenzierung wird für jeden Beobachtungsstandort separat durchgeführt. Gleichzeitig mit den vier Flächenmischproben der aktuellen Erhebung werden die vier Proben desselben Standorts aus einer früheren Erhebung nochmals gemessen. Die Differenz zwischen den wiederholten Messungen der alten Proben und deren Originalbestimmung widerspiegelt den (systematischen) Fehler aufgrund technischer Veränderungen. Mithilfe dieser Information können die neuen Messungen entsprechend korrigiert werden (vgl. Meuli et al. 2014).

**A1-5 Standortmittelwerte und Konfidenzintervalle**

Für sämtliche Auswertungen wurde der Mittelwert der vier Mischproben pro Standort und Erhebung verwendet. Vereinzelt konnten nur die Werte von drei Mischproben verwendet werden, da die Messungen einzelner Proben fehlerhaft waren. Für einen Teil der Standorte ist für die erste Erhebung (1985–89) nur eine Mischprobe vorhanden.

Bei Standorten und Erhebungen mit drei oder vier Mischproben wurde das 95 %-Konfidenzintervall berechnet. Für den Standort  $i$  bei der Erhebung  $j$  berechnet sich dieses wie folgt:

$$\bar{x}_{ij} \pm t_{1-\frac{\alpha}{2}, n-1} \cdot \frac{s_{ij}}{\sqrt{n}}$$

wobei  $t$  dem  $t$ -Wert für das Signifikanzniveau  $\alpha$  (für ein 95 %-Konfidenzintervall ist  $\alpha = 5\%$  mit  $n-1$  Freiheitsgraden und  $n$  der Anzahl Mischproben entspricht.  $\bar{x}_{ij}$  ist der Mittelwert des Standorts bei der Erhebung  $j$  und  $s_{ij}$  die entsprechende Standardabweichung. Letztere lässt sich folgendermassen schätzen:

$$s_{ij} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (x_k - \bar{x}_{ij})^2}$$

## A2 Details zu den Schwermetallen

### A2-1 Cadmium

Während der letzten 20 Jahre haben sich die Cadmium-Gehalte im Oberboden nur wenig verändert (vgl. Abb. 35).

In Bezug auf die drei wichtigsten Landnutzungskategorien Ackerbau, Grasland und Wald liegen die Mediane der Cadmium-Gehalte in der Grössenordnung von 20 bis 30 % des Richtwertes der VBBo (Tab. 7). Der höchste Cadmium-Gehalt von 1,9 mg/kg wird am extensiv genutzten Graslandstandort La Brévine gemessen und dürfte auf die Zusammensetzung des geologischen Ausgangsmaterials zurückzuführen sein (Dubois et al. 2002; Prudente et al. 2002; Quezada-Hinjosa et al. 2009).

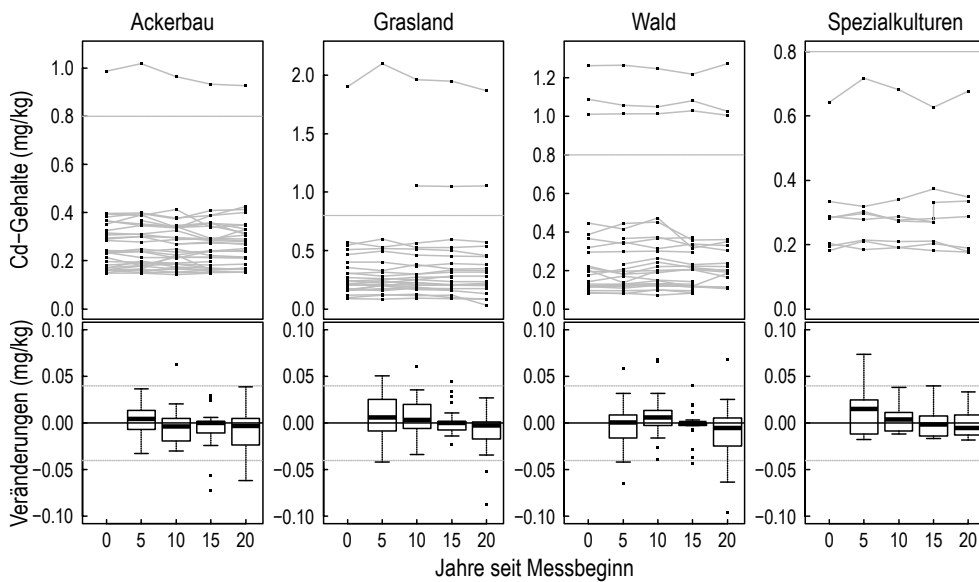
**Tab. 7 > Kennzahlen für Cadmium**

*Gehalte in mg/kg TS. Richtwert gemäss VBBo: 0,8 mg/kg.*

	Alle Standorte	Ackerbau	Grasland	Wald	Spezialkulturen
n	100	33	25	27	9
Minimum	0,03	0,15	0,03	0,07	0,18
10 %-Perzentile	0,11	0,16	0,09	0,08	0,18
<b>Median</b>	<b>0,24</b>	<b>0,25</b>	<b>0,23</b>	<b>0,20</b>	<b>0,29</b>
Mittelwert	0,31	0,27	0,36	0,30	0,31
90 %-Perzentile	0,50	0,40	0,57	0,88	0,55
Maximum	1,87	0,93	1,89	1,27	0,68



Abb. 35 > Cadmium-Gehalte 1985–2009 auf NABO-Standorten nach Landnutzung



A2-2 **Zink**

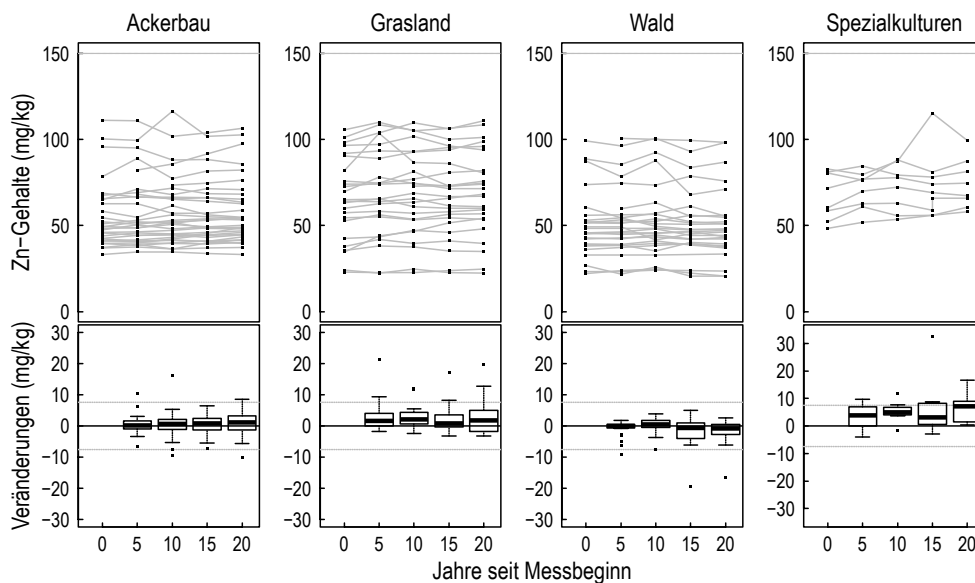
Betrachtet man die Veränderungen während der letzten 20 Jahre aufgeteilt nach den Hauptnutzungen (Abb. 36), so sind keine bedeutenden Veränderungen ersichtlich. Wie in Kapitel 0 besprochen, gibt es eine deutliche Zunahme von Zink unter intensiv genutztem Grasland sowie an einigen Ackerstandorten.

Die Zink-Gehalte an den NABO-Referenzmessstandorten liegen zwischen 21 mg/kg am Waldstandort Alvaneu und 140 mg/kg im Stadtpark von Lugano (Tab. 8). Das 10%-Perzentil der Ackerstandorte (40 mg/kg) ist höher als jenes der Grasland- und Waldstandorte (35 bzw. 26 mg/kg). Die Graslandstandorte weisen jedoch mit 68 mg/kg den höheren Median auf als die Ackerstandorte (53 mg/kg).

**Tab. 8 > Kennzahlen für Zink**

Gehalte in mg/kg TS. Richtwert gemäss VBBo: 150 mg/kg.

	Alle Standorte	Ackerbau	Grasland	Wald	Spezialkulturen
n	100	33	25	26	9
Minimum	20,5	33,3	22,4	20,5	57,9
10 %-Perzentile	37,4	40,0	34,9	25,6	59,0
<b>Median</b>	<b>55,7</b>	<b>53,4</b>	<b>68,2</b>	<b>47,1</b>	<b>74,5</b>
Mittelwert	61,3	58,0	68,7	50,5	75,4
90 %-Perzentile	97,7	88,0	101,1	84,8	94,8
Maximum	139,8	106,4	110,8	98,2	99,6

**Abb. 36 > Zink-Gehalte 1985–2009 auf NABO-Standorten nach Landnutzung**

A2-3

**Kupfer**

Abgesehen von den Zunahmen unter intensivem Grasland sowie an einigen Ackerstandorten (vgl. Kapitel 0) sind für Kupfer keine Veränderungen über die letzten 20 Jahre ersichtlich (Abb. 37).

Der mittlere Kupfergehalt (Median) der NABO-Ackerstandorte liegt mit 20 mg/kg bei der Hälfte des Richtwertes (Tab. 9). Damit ist er rund doppelt so hoch wie der mittlere Gehalt auf Waldstandorten. Der mittlere Gehalt der Graslandstandorte liegt zwischen diesen beiden Werten. Das 90 %-Perzentil der Ackerstandorte liegt mit 41 mg/kg über dem Richtwert. Für die Grasland- und Waldstandorte liegt es darunter.

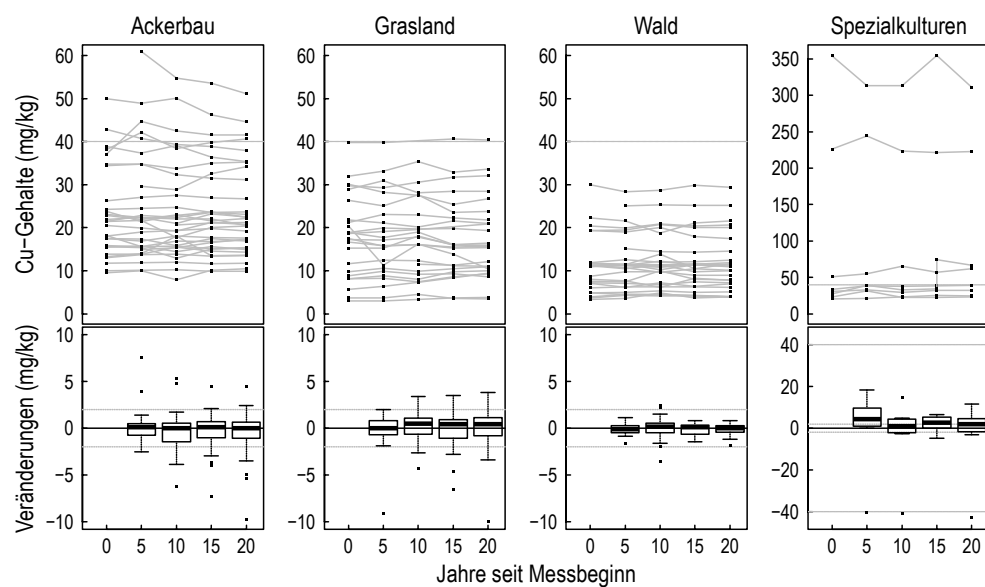
Die höchsten Kupfergehalte mit 355, 311 und 223 mg/kg weisen jene drei NABO-Standorte auf, welche für Rebbau genutzt werden (in Tab. 9 unter «Spezialkulturen» erfasst). Der Grund für diese Richtwertüberschreitungen liegt vor allem in der langjährigen Anwendung von kupferhaltigen Fungiziden (Studer et al. 1995). Auch die hohen Kupferbelastungen an den Standorten Duggingen (Obstbau; 62 mg/kg) und Dällikon (Gemüsebau; 67 mg/kg) dürften durch Pflanzenschutzmittel verursacht sein. Ein Mix von Immissionen ist wahrscheinlich der Grund für die Richtwertüberschreitung im Stadtpark von Lugano. Dagegen dürften geogene Ursachen für die verbleibenden Richtwertüberschreitungen (Standorte Mollis, Vallon, Oberriet und Paspels) verantwortlich sein (Desaules & Studer 1993).

**Tab. 9 > Kennzahlen für Kupfer**

Gehalte in mg/kg TS. Richtwert gemäss VBBo: 40 mg/kg.

	Alle Standorte	Ackerbau	Grasland	Wald	Spezialkulturen
n	100	33	25	27	9
Minimum	3,5	9,9	3,5	3,9	23,1
10 %-Perzentile	6,8	13,2	8,6	4,0	23,7
<b>Median</b>	<b>17,2</b>	<b>20,7</b>	<b>15,7</b>	<b>10,9</b>	<b>62,2</b>
Mittelwert	28,0	23,7	17,5	11,7	126,3
90 %-Perzentile	40,5	40,8	32,0	21,4	337,3
Maximum	354,7	51,1	40,4	29,5	354,7

**Abb. 37 > Kupfer-Gehalte 1985–2009 auf NABO-Standorten nach Landnutzung**



**A2-4 Quecksilber**

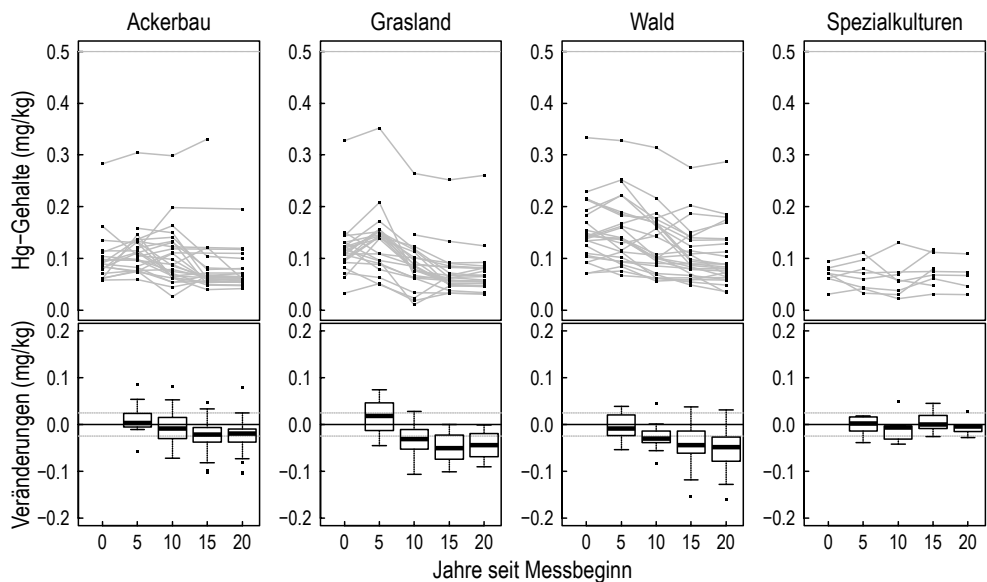
Während der letzten 20 Jahre wurden für Quecksilber deutliche Abnahmen beobachtet (Abb. 38). Dies dürfte vor allem eine Folge von reduzierten Emissionen in die Luft sein (vgl. Kapitel 3.4). Die Gehalte an Quecksilber bewegen sich an allen NABO-Standorten deutlich unterhalb des Richtwertes (Tabelle 10).

**Tab. 10 > Kennzahlen für Quecksilber**

Gehalte in mg/kg TS. Richtwert gemäss VBBo: 0,5 mg/kg.

	Alle Standorte	Ackerbau	Grasland	Wald	Spezialkulturen
n	99	33	25	27	9
Minimum	0,01	0,04	0,03	0,03	0,03
10 %-Perzentile	0,05	0,05	0,03	0,05	0,04
<b>Median</b>	<b>0,08</b>	<b>0,07</b>	<b>0,07</b>	<b>0,09</b>	<b>0,08</b>
Mittelwert	0,09	0,09	0,07	0,11	0,10
90 %-Perzentile	0,18	0,17	0,09	0,18	0,22
Maximum	0,39	0,20	0,26	0,29	0,26

**Abb. 38 > Quecksilber-Gehalte 1985–2009 auf NABO-Standorten nach Landnutzung**



**A2-5 Blei**

Die mittleren Gehalte der Hauptnutzungskategorien liegen zwischen 24 (Ackerbau) und 30 mg/kg (Wald). Die 10 %-Perzentile der Acker-, Grasland- und Waldstandorte liegen alle knapp über 15 mg/kg (Tabelle 11). Vereinzelt weisen Wald- und Graslandstandorte Gehalte über dem Richtwert von 50 mg/kg auf. Diese können durch den

Menschen verursacht sein, beispielsweise am Standort Krummenau (militärische Nutzung) oder in den Stadtpärken Winterthur und Lugano (Belastung durch Strassenverkehr und andere Immissionsquellen; vgl. BUWAL 1992; AfU SG 1996). Für hohe Bleiwerte sind jedoch auch geologische Ursachen möglich, wie das Beispiel des Standortes im Nationalpark zeigt (Obrecht & Schlupe 1994).

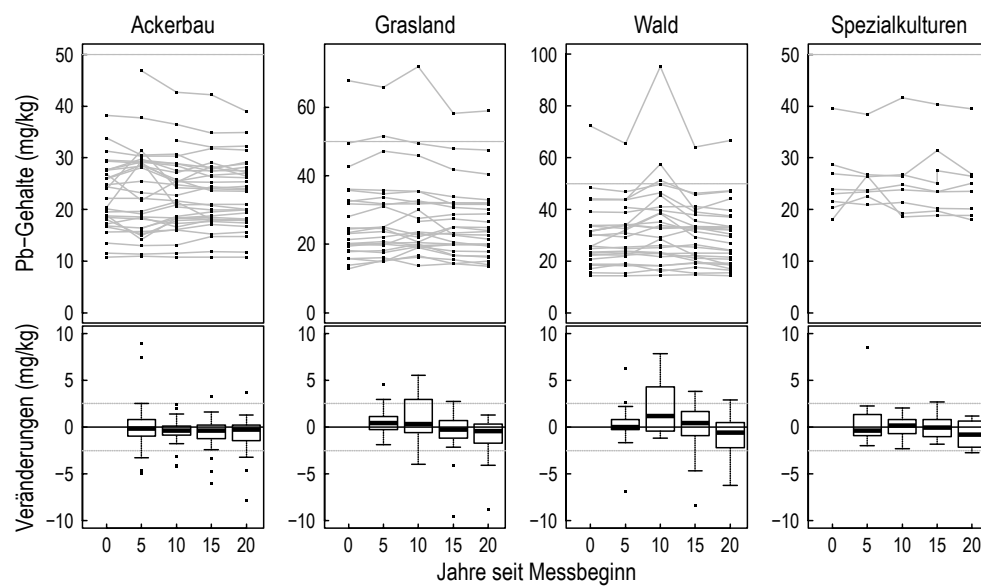
Aufgrund der geringeren Bleibelastung der Luft wurden während der letzten 20 Jahre rückläufige oder gleichbleibende Bleigehalte im Boden gemessen (Abb. 39 und Kapitel 3.4).

**Tab. 11 > Kennzahlen für Blei**

Gehalte in mg/kg TS. Richtwert gemäss VBBo: 50 mg/kg.

	Alle Standorte	Acker	Grasland	Wald	Spezialkulturen
n	100	33	25	26	9
Minimum	10,8	10,8	13,5	14,2	18,0
10 %-Perzentile	16,4	15,5	15,1	16,6	18,3
<b>Median</b>	<b>24,6</b>	<b>23,5</b>	<b>23,7</b>	<b>29,5</b>	<b>24,8</b>
Mittelwert	27,9	22,9	26,0	29,7	24,8
90 %-Perzentile	40,0	31,7	40,4	46,3	34,4
Maximum	124,6	39,0	59,0	66,6	39,5

**Abb. 39 > Blei-Gehalte 1985–2009 auf NABO-Standorten nach Landnutzung**



## A2-6 Nickel, Chrom und Cobalt

Wie bereits im Kapitel 3.1 erläutert, hängen die Gehalte an Nickel, Chrom und Cobalt auf den NABO-Standorten hauptsächlich von den geologischen Bedingungen ab. Es wurden kaum Veränderungen bei den jeweiligen Konzentrationen im Boden beobachtet.

**Tab. 12 > Kennzahlen für Nickel**

Gehalte in mg/kg TS. Richtwert gemäss VBB: 50 mg/kg.

	Alle Standorte	Ackerbau	Grasland	Wald	Spezialkulturen
n	100	33	25	27	9
Minimum	2,0	14,3	2,0	2,2	12,4
10 %-Perzentile	8,1	16,3	7,2	7,4	14,4
<b>Median</b>	<b>23,4</b>	<b>24,8</b>	<b>22,9</b>	<b>18,1</b>	<b>24,5</b>
Mittelwert	26,7	28,7	32,5	20,8	26,8
90 %-Perzentile	42,5	48,2	43,9	39,2	49,6
Maximum	269,0	77,6	269,0	44,5	62,2

**Tab. 13 > Kennzahlen für Chrom**

Gehalte in mg/kg TS. Richtwert gemäss VBB: 50 mg/kg.

	Alle Standorte	Ackerbau	Grasland	Wald	Spezialkulturen
n	100	33	25	27	9
Minimum	1,6	18,4	6,9	3,6	13,2
10 %-Perzentile	14,8	19,5	14,4	13,4	14,5
<b>Median</b>	<b>25,6</b>	<b>25,2</b>	<b>30,4</b>	<b>22,0</b>	<b>25,8</b>
Mittelwert	32,8	28,5	52,8	25,2	26,8
90 %-Perzentile	41,8	40,5	45,3	42,9	43,3
Maximum	621,5	58,1	621,5	60,2	48,7

**Tab. 14 > Kennzahlen für Cobalt**

Gehalte in mg/kg TS. Richtwert gemäss VSB (1986): 25 mg/kg.

	Alle Standorte	Ackerbau	Grasland	Wald	Spezialkulturen
n	100	33	25	27	9
Minimum	0,5	4,3	1,0	1,3	3,1
10 %-Perzentile	3,3	4,6	2,0	2,6	3,9
<b>Median</b>	<b>6,0</b>	<b>6,3</b>	<b>6,6</b>	<b>5,1</b>	<b>6,0</b>
Mittelwert	6,9	7,5	7,7	5,7	7,0
90 %-Perzentile	11,0	11,2	10,4	10,8	10,6
Maximum	45,7	24,1	45,7	13,2	11,0

Abb. 40 > Nickel-Gehalte 1985–2009 auf NABO-Standorten nach Landnutzung

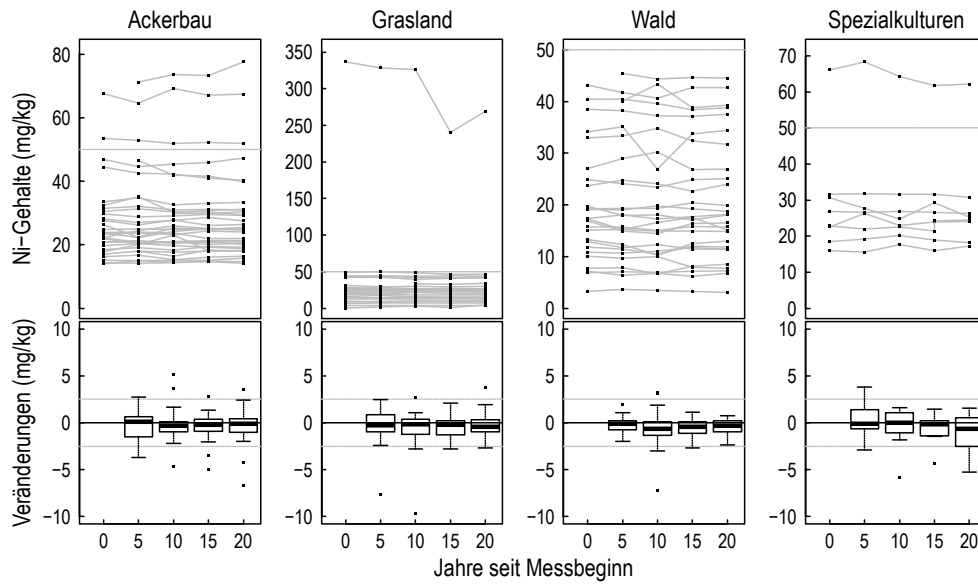
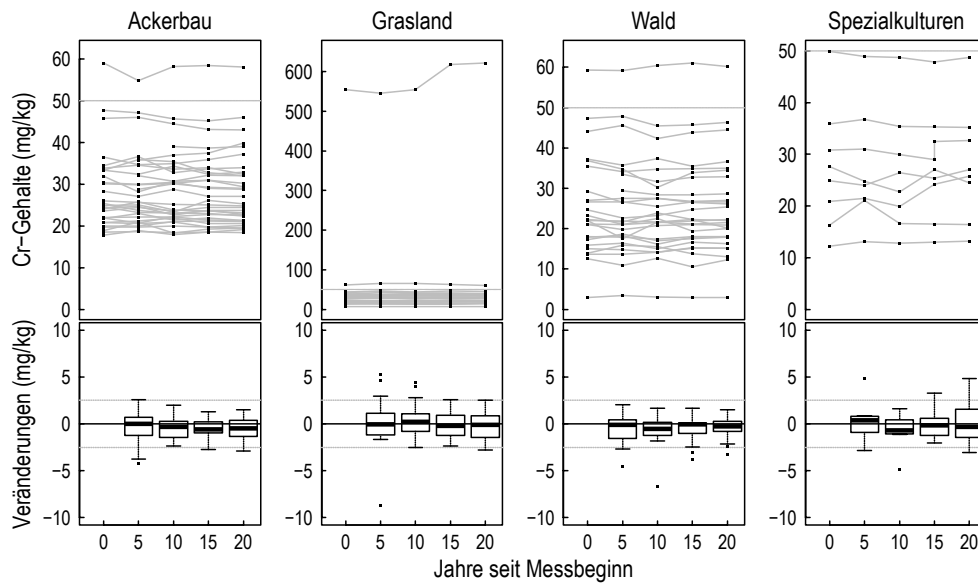
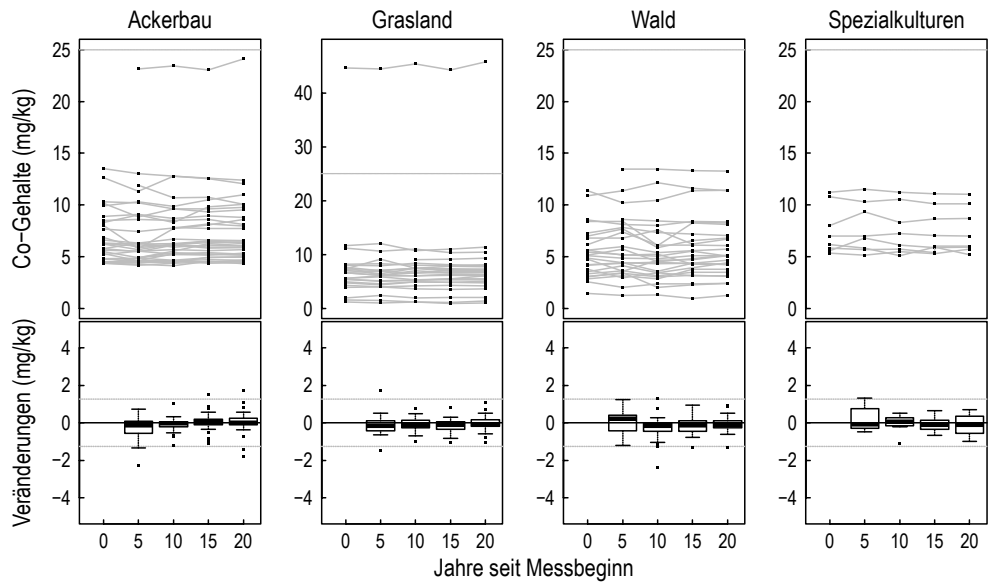


Abb. 41 > Chrom-Gehalte 1985–2009 auf NABO-Standorten nach Landnutzung



**Abb. 42 > Cobalt-Gehalte 1985–2009 auf NABO-Standorten nach Landnutzung**



**A2-7 Organischer Kohlenstoff**

Die Bedeutung der organischen Substanz im Boden sowie deren zeitlichen Veränderungen wurden ausführlich im entsprechenden Kapitel des Haupttextes besprochen. Wir beschränken uns an dieser Stelle deshalb auf die Kennzahlen und die Übersichtsgrafik. Die Werte wurden gemäss FAL-Referenzmethode bestimmt oder per Trockenveraschung und auf das entsprechende Niveau umgerechnet.

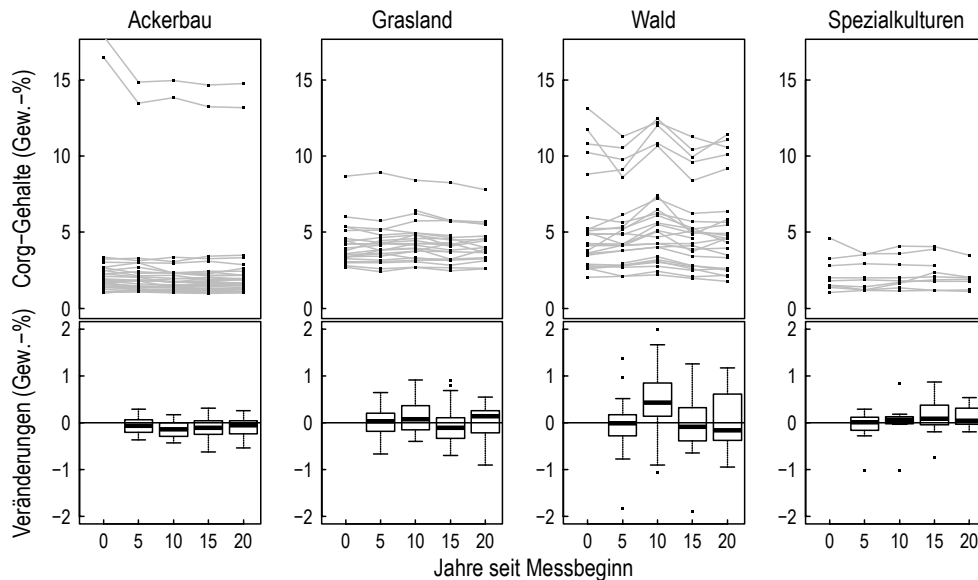
**Tab. 15 > Kennzahlen für organischen Kohlenstoff**

Gehalte in Gew.-% (g/g TS\*100).

	Alle Standorte	Ackerbau	Grasland	Wald	Spezialkulturen
n	97	34	26	28	11
Minimum	1,0	1,0	2,6	1,8	1,1
10 %-Perzentile	1,3	1,1	2,9	2,4	1,2
<b>Median</b>	<b>3,1</b>	<b>1,6</b>	<b>4,0</b>	<b>4,6</b>	<b>2,0</b>
Mittelwert	3,7	2,5	4,1	5,1	2,2
90 %-Perzentile	5,8	3,2	5,6	10,2	3,6
Maximum	14,8	14,8	7,8	11,4	3,9



**Abb. 43 > Gehalte an Organischem Kohlenstoff 1985–2009 auf NABO-Standorten nach Landnutzung**



**A2-8 pH-Wert**

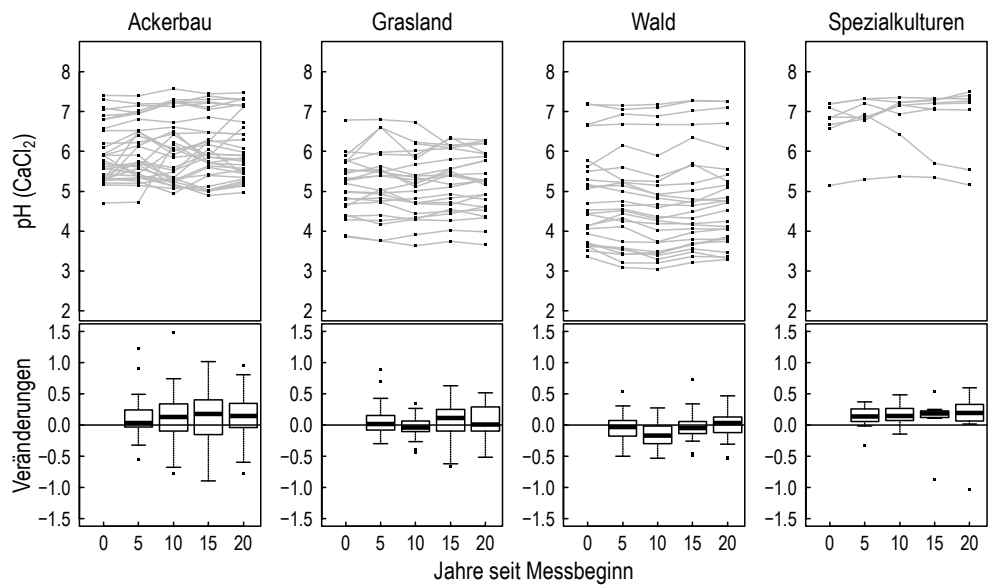
Der pH-Wert ist ein Indikator dafür, wie sauer ein Boden ist. Erwartungsgemäss werden auf Ackerbaustandorten (Median: 5,9) tendenziell höhere pH-Werte beobachtet als auf Grasland- und Waldstandorten (Median: 5,2 bzw. 4,7; vgl. Tab. 16). Bei den Waldstandorten werden vor allem unter Nadelwald saure Bodenbedingungen und somit tiefe pH-Werte beobachtet. Der Median liegt unter Laubwald bei 5,0, unter Nadelwald bei 4,4. Landnutzung und pH-Wert aber auch Vegetation und pH-Wert beeinflussen sich gegenseitig. Das bedeutet: Nutzung und Vegetation beeinflussen den pH-Wert, aber der pH-Wert hat seinerseits grossen Einfluss darauf, wie ein Boden genutzt wird bzw. welche Vegetation darauf entsteht.

Die pH-Werte haben sich auf den NABO-Standorten während der letzten 20 Jahre kaum verändert (Abb. 44). Auf einigen Ackerstandorten wurden deutliche Zunahmen beobachtet. Diese Flächen wurden sehr wahrscheinlich mit Kalk gedüngt.

Tab. 16 > Kennzahlen für pH(CaCl<sub>2</sub>)

	Alle Standorte	Ackerbau	Grasland	Wald	Spezialkulturen
n	100	33	25	27	9
Minimum	3,3	5,0	3,7	3,3	5,2
10 %-Perzentile	3,9	5,2	4,3	3,4	5,3
<b>Median</b>	<b>5,4</b>	<b>5,9</b>	<b>5,2</b>	<b>4,7</b>	<b>7,2</b>
Mittelwert	5,5	6,1	5,2	4,8	6,7
90 %-Perzentile	7,2	7,3	6,2	7,0	7,5
Maximum	7,5	7,5	6,3	7,3	7,5

Abb. 44 > pH-Werte 1985–2009 auf NABO-Standorten nach Landnutzung



A2-9 Zu- und Abnahmen nach Element

Tab. 17 > Zu- und Abnahmen 1985–2009 an NABO-Standorten für Cadmium, Zink, Kupfer und Quecksilber

	Anz. Standorte	Cadmium			Zink			Kupfer			Quecksilber		
		+	0	-	+	0	-	+	0	-	+	0	-
<b>Ackerbau</b>	<b>33</b>	<b>0</b>	<b>29</b>	<b>4</b>	<b>9</b>	<b>21</b>	<b>3</b>	<b>5</b>	<b>22</b>	<b>6</b>	<b>3</b>	<b>12</b>	<b>12</b>
<b>Grasland</b>	<b>25</b>	<b>1</b>	<b>22</b>	<b>2</b>	<b>5</b>	<b>20</b>	<b>0</b>	<b>5</b>	<b>19</b>	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>2</b>	<b>23</b>
• intensiv	6	1	5	0	5	1	0	4	2	0	0	0	6
• wenig intensiv	9	0	8	1	0	9	0	0	9	0	0	0	9
• extensiv	10	0	9	1	0	10	0	1	8	1	0	2	8
<b>Wald</b>	<b>27</b>	<b>0</b>	<b>24</b>	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>23</b>	<b>4</b>	<b>0</b>	<b>24</b>	<b>3</b>	<b>0</b>	<b>5</b>	<b>22</b>
• Laub-	10	0	8	1	0	10	0	0	10	0	0	2	8
• Misch-	7	0	6	0	0	5	2	0	5	2	0	1	6
• Nadel-	10	0	10	0	0	8	2	0	9	1	0	2	8
<b>Spezialkulturen</b>	<b>9</b>	<b>0</b>	<b>8</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>7</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>7</b>	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>6</b>	<b>3</b>
• Gemüse	3	0	3	0	1	2	0	1	1	1	0	2	1
• Obst	3	0	3	0	0	3	0	0	3	0	0	3	0
• Reben	3	0	2	1	0	2	1	0	3	0	0	1	2
<b>Andere</b>		<b>0</b>	<b>3</b>	<b>3</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>5</b>	<b>0</b>	<b>5</b>	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
• Schutzstandort	4	0	3	1	0	1	3	0	3	1	0	1	2
• Stadtpark	2	0	0	2	0	0	2	0	2	0	0	1	1
<b>Total</b>	<b>100</b>	<b>1</b>	<b>86</b>	<b>11</b>	<b>15</b>	<b>72</b>	<b>13</b>	<b>11</b>	<b>77</b>	<b>12</b>	<b>3</b>	<b>27</b>	<b>63</b>

Tab. 18 > Zu- und Abnahmen 1985–2009 an NABO-Standorten für Blei, Nickel, Chrom und Cobalt

	Anz. Standorte	Blei			Nickel			Chrom			Cobalt		
		+	0	-	+	0	-	+	0	-	+	0	-
<b>Ackerbau</b>	<b>33</b>	<b>1</b>	<b>23</b>	<b>9</b>	<b>0</b>	<b>28</b>	<b>5</b>	<b>0</b>	<b>28</b>	<b>5</b>	<b>2</b>	<b>30</b>	<b>1</b>
<b>Grasland</b>	<b>25</b>	<b>0</b>	<b>18</b>	<b>7</b>	<b>1</b>	<b>23</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>23</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>25</b>	<b>0</b>
• intensiv	6	0	3	3	0	6	0	0	6	0	0	6	0
• wenig intensiv	9	0	6	3	1	8	0	0	9	0	0	9	0
• extensiv	10	0	9	1	0	9	1	2	8	0	0	10	0
<b>Wald</b>	<b>27</b>	<b>0</b>	<b>22</b>	<b>5</b>	<b>0</b>	<b>25</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>24</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>23</b>	<b>2</b>
• Laub-	10	0	9	1	0	9	1	1	8	1	1	8	1
• Misch-	7	0	3	4	0	7	0	1	6	0	1	5	1
• Nadel-	10	0	10	0	0	9	1	0	10	0	0	10	0
<b>Spezialkulturen</b>	<b>9</b>	<b>0</b>	<b>5</b>	<b>4</b>	<b>0</b>	<b>6</b>	<b>3</b>	<b>0</b>	<b>7</b>	<b>2</b>	<b>0</b>	<b>6</b>	<b>3</b>
• Gemüse	3	0	2	1	0	2	1	0	2	1	0	2	1
• Obst	3	0	2	1	0	3	0	0	3	0	0	3	0
• Reben	3	0	1	2	0	1	2	0	2	1	0	1	2
<b>Andere</b>		<b>0</b>	<b>2</b>	<b>4</b>	<b>1</b>	<b>5</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>4</b>	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>6</b>	<b>0</b>
• Schutzstandort	4	0	1	3	1	3	0	1	3	0	0	4	0
• Stadtpark	2	0	1	1	0	2	0	0	1	1	0	2	0
<b>Total</b>	<b>100</b>	<b>1</b>	<b>70</b>	<b>29</b>	<b>2</b>	<b>87</b>	<b>11</b>	<b>5</b>	<b>86</b>	<b>9</b>	<b>4</b>	<b>90</b>	<b>6</b>

## A2-10 Richtwertüberschreitungen

Die Verordnung über Belastungen des Bodens (VBBo 1998) legt Richtwerte fest. Man nimmt an, dass die Bodenfruchtbarkeit langfristig nicht beeinträchtigt ist, wenn die Schwermetallbelastung unter den jeweiligen Richtwerten liegt (Art. 35 Abs. 2 USG 1983). Ein Blick auf Tabelle 19 zeigt, dass nur auf wenigen NABO-Standorten die Richtwerte überschritten werden. Dies entspricht den Erwartungen, denn das NABO-Messnetz wurde darauf ausgerichtet, die Hintergrundbelastung zu erfassen.

Viele der Richtwertüberschreitungen sind nicht durch den Menschen und seine Aktivitäten verursacht. Alle Überschreitungen, die für Cadmium, Cobalt, Chrom und Nickel beobachtet werden, dürften geologische Ursachen haben. Das bedeutet, dass die gefundenen Schwermetalle aus dem Gestein stammen, aus dem der Boden entstanden ist. So liegen beispielsweise sämtliche Standorte mit zu hohen Cadmiumkonzentrationen im Jura auf Kalkgestein. Es ist bekannt, dass sich das im Gestein enthaltene Cadmium bei der Kalkauswaschung anreichert (Tuchschnid 1995; Dubois et al. 2002; Prudente et al. 2002; Quezada-Hinjosa et al. 2009).

Tab. 19 &gt; Richtwertüberschreitungen nach Landnutzung

Nutzung	Anz. Standorte	Cd	Zn	Cu	Hg	Pb	Ni	Cr	Co*
<b>Ackerbau</b>	<b>33</b>	<b>1</b>		<b>4</b>			<b>3</b>	<b>1</b>	
<b>Grasland</b>	<b>25</b>								
• intensiv	6			1					
• wenig intensiv	9								
• extensiv	10	2				1	1	2	1
<b>Wald</b>	<b>27</b>								
• Laub-	10	2				1		1	
• Misch-	7								
• Nadel-	10	1							
<b>Spezialkulturen</b>	<b>9</b>								
• Gemüse	3			1					
• Obst	3			1					
• Reben	3			3			1		
<b>Andere</b>									
• Schutzstandort	4					1			
• Stadtpark	2			1		2			
<b>Total</b>	<b>100</b>	<b>5</b>	<b>0</b>	<b>11</b>	<b>0</b>	<b>5</b>	<b>5</b>	<b>4</b>	<b>1</b>

\* Richtwert der VSBo (1986)

Nicht berücksichtigt: Standorte 42, 67 und 104.

---

Die hohen Kupferkonzentrationen auf Reb-, Obst- und Gemüsebaustandorten wurden durch den Einsatz von kupferhaltigen Pflanzenschutzmitteln verursacht. Auf Rebbaustandorten wurde beispielsweise lange Zeit die Bordeaux-Brühe (Kupfervitriol) als Fungizid eingesetzt (Studer et al. 1995). Auch der hohe Wert im Stadtpark Lugano dürfte durch den Menschen verursacht sein. Die restlichen Richtwertüberschreitungen bei Kupfer haben hingegen geologische Ursachen.

Richtwertüberschreitungen bei Blei können durch den Menschen verursacht sein: Verkehrsimmissionen in Stadtpärken, Nutzung als Schiessplatz bei Grünland oder Auskämmeffekte beim Waldstandort Novaggio. Allerdings können hohe Bleigehalte ebenso geologische Ursachen haben, wie die Fläche im Nationalpark zeigt (Obrecht & Schlupe 1994).

Die Anzahl Richtwertüberschreitungen veränderte sich gegenüber der vorhergehenden Erhebungen nur in einem einzigen Fall: Ein Standort mit Gemüsebau (Dällikon) liegt neu über dem Grenzwert. Dies liegt daran, dass der Standort verschoben werden musste. Die neue Fläche ist stärker belastet.

Die Anzahl Richtwertüberschreitungen blieb im NABO-Messnetz über den gesamten Zeitraum von 1985 bis 2009 praktisch konstant. Die Gehalte der meisten Standorte liegen deutlich unterhalb des Richtwertes, d. h. die Anzahl Richtwertüberschreitungen reagiert sehr träge auf allfällige Zunahmen. Um Veränderungen – insbesondere negative – frühzeitig zu erkennen, sollte deshalb die Entwicklung der Gehalte betrachtet werden.

---

## > Dank

Ein nationales Bodenmessnetz, wie es die NABO seit 1985 betreibt, kann nur durch die tatkräftige Mithilfe und Unterstützung zahlreicher Akteure realisiert und weiterentwickelt werden. Die Nationale Bodenbeobachtung bedankt sich insbesondere ganz herzlich bei den Bewirtschaftern und Grundbesitzern der Dauerbeobachtungsflächen, ohne deren Kooperation wir unser Messnetz nicht betreiben könnten.

Bedanken möchten wir uns bei der NABO-Projektüberleitung sowie der NABO-Projektleitung für ihre Unterstützung und ihr Vertrauen in unsere Arbeit. Besonders verdanken möchten wir an dieser Stelle Toni Candinas und Dominique Kohli, die sich nach langjährigem Engagement für das Wohlergehen der NABO nun anderen Aufgaben widmen. Der NABO-Begleitgruppe danken wir für ihr Interesse an unserer Arbeit und die wertvollen Denkanstösse. Ebenso danken wir Gregor Klaus für die redaktionelle Überarbeitung des Berichtes.

Ein grosses Dankeschön gehört den Laborantinnen und Laboranten aus der Forschungsgruppe Umweltanalytik von Agroscope sowie deren Leitung für die jahrelange und intensive Zusammenarbeit. Ebenso danken wir dem Feld- und Koordinationsteam des Indikators Z9 des Biodiversitätsmonitorings Schweiz (BDM), die im Rahmen des Projektes BDM-NABO sehr viel Zusatzarbeit geleistet haben. Und schliesslich danken wir allen aktuellen und ehemaligen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern der NABO für die tatkräftige Mithilfe im Feld und im Labor.

## > Literatur

- Afu SG 1996: Schadstoffbelastung siedlungsnaher Landwirtschaftsböden im Kt. St.Gallen. Amt für Umweltschutz des Kantons St. Gallen, Fachstelle Bodenschutz, St. Gallen: 63 S.
- BAFU 2012: Luftbelastung 2011. Messresultate des Nationalen Beobachtungsnetzes für Luftfremdstoffe (NABEL). Bundesamt für Umwelt (BAFU), Bern: 128 S.
- BAFU & BLW 2012: Nährstoffe und Verwendung von Düngern in der Landwirtschaft. Ein Modul der Vollzugshilfe Umweltschutz in der Landwirtschaft. Umwelt-Vollzug Nr. 1225. Bundesamt für Umwelt, Bern: 62 S.
- BFS & BAFU 2011: Umweltstatistik Schweiz in der Tasche 2011. Neuenburg: 36 S.
- Bolan N.S., Adriano D. C., Mahimairaja S. 2004: Distribution and bioavailability of trace elements in livestock and poultry manure by-products. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology* 34: 291–338.
- Brändli R.C., Bucheli T.D., Ammann S., Desaulles A., Keller A., Blum F., Stahel W.A. 2008: Critical evaluation of PAH source apportionment tools using data from the Swiss soil monitoring network. *Journal of Environmental Monitoring*, 10: 1278–1286.
- BUWAL 1992: Bodenverschmutzung durch den Strassen- und Schienenverkehr in der Schweiz. Schriftenreihe Umwelt Nr. 185. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), Bern: 144 S.
- Commission of the European Communities (CEC) 2006: Thematic Strategy for Soil Protection. Communication (COM(2006) 231), Brüssel: 12 S.
- Della Peruta R. 2013: Modelling long-term phosphorus dynamics in Swiss agricultural soils using EPIC. Dissertation Nr. 21 490. ETH Zürich: 130 S.
- Desaules A., Dahinden R. 2000: Nationales Boden-Beobachtungsnetz. Veränderungen von Schadstoffgehalten nach 5 und 10 Jahren. Schriftenreihe Umwelt Nr. 320, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), Bern: 129 S.
- Desaules A., Keller A., Schwab P., Dahinden R. 2004: Analysen von Zeitreihen und Ursachen gemessener Konzentrationsveränderungen von Schwermetallen und Phosphor in Böden auf Dauerbeobachtungsflächen. Agroscope FAL Reckenholz, Eidg. Forschungsanstalt für Agrarökologie und Landbau, Zürich: 107 S.
- Desaules A., Ammann S., Blum F., Brändli R.C., Bucheli T.D. 2009: PAK- und PCB-Gehalte in Böden der Schweiz. Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon, Zürich: 87 S.
- Desaules A., Brändli R.C., Ammann S., Bucheli T.D., Blum F., Keller A. 2008: PAH and PCB in soils of Switzerland – Status and critical review. *Journal of Environmental Monitoring* 10: 1265–1277.
- Desaules A., Schwab P., Keller A., Ammann S., Paul J., Bachmann H.J. 2006: Anorganische Schadstoffgehalte in Böden der Schweiz und Veränderungen nach 10 Jahren. Ergebnisse der Nationalen Bodenbeobachtung 1985–1999. Agroscope FAL Reckenholz, Eidg. Forschungsanstalt für Agrarökologie und Landbau, Zürich: 139 S.
- Desaules A., Studer K. 1993: NABO – Nationales Bodenbeobachtungsnetz. Messresultate 1985–1991. Schriftenreihe Umwelt Nr. 200. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), Bern: 134 S., Anhänge 175 S.
- Dettwiler J., Clément J.-P., Chassot G. 2006: Düngung und Umwelt. Fachkommentare zum anwendbaren Bundesrecht. Umwelt-Wissen Nr. 0617. Bundesamt für Umwelt. Bern: 83 S.
- Dubois J.-P., Benitez N., Liebig T., Baudraz M., Okopnik F. 2002: Le Cadmium dans les sols du haut Jura suisse. In: Baize D., Tercé M. (Hrsg.) 2002: Les éléments traces métalliques dans les sols. Approches fonctionnelles et spatiales. INRA, Orléans: 33–52.
- Ellert B H., Bettany J. R. 1995: Calculation of organic matter and nutrients stored in soils under contrasting management regimes. *Canadian Journal of Soil Science*, 75(4): 529–538.
- Fisch R., Sinaj S., Charles R., Richner W. 2009: Grundlagen für die Düngung im Acker- und Futterbau (GRUDAF). *Agrarforschung*. 16, (2).
- FMBV 2011: Verordnung über die Produktion und das Inverkehrbringen von Futtermitteln, Zusatzstoffen für die Tierernährung und Diätfuttermitteln. SR 916.307.1.
- Gisi U., Schenker R., Schulin R., Stadelmann F. X., Sticher H. 1997: Bodenökologie. 2. Auflage. Thieme, Stuttgart: 351 S.
- Hämmann M., Desaules A. 2003: Handbuch: Probenahme und Probenvorbereitung für Schadstoffuntersuchungen in Böden. Vollzug Umwelt (VU-4814-D). Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), Bern: 100 S.
- Heldstab J., Reutimann J., Biedermann R., Leu D. 2010: Stoffflussanalyse Stickstoff Schweiz 2005. Umwelt-Wissen Nr. 1018. Bundesamt für Umwelt, Bern.: 128 S.
- Heldstab J., Leippert F., Biedermann R., Schwank O. 2013: Stickstoffflüsse in der Schweiz 2020. Stoffflussanalyse und Entwicklungen. Umwelt-Wissen Nr. 1309. Bundesamt für Umwelt, Bern: 107 S.
- Keller A., Abbaspour K.C., Schulin R. 2002: Assessment of uncertainty and risk in modeling regional heavy-metal accumulation in agricultural soils. *Journal of Environmental Quality*, 31: 175–187.
- Keller A., Rossier N., Desaules A. 2005: Schwermetallbilanzen von Landwirtschaftsparzellen der Nationalen Bodenbeobachtung.

- Schriftenreihe der FAL Nr. 54. Agroscope FAL Reckenholz, Eidg. Forschungsanstalt für Agrarökologie und Landbau, Zürich: 56 S.
- Keller A., Desaulles A., Schwab P., Weisskopf P., Scheid S., Oberholzer H. 2006: Monitoring soil quality in the long term: Examples from the Swiss Soil Monitoring Network. *Mitteilungen der Österreichischen Bodenkundlichen Gesellschaft*, 73: 5–12.
- Kessler J., Zogg M., Bächler E. 1994: Phosphor, Kupfer und Zink im Schweinetrog. *Agrarforschung* 1(11–12): 480–483.
- Koordinationsstelle Biodiversitäts-Monitoring Schweiz 2009: Zustand der Biodiversität in der Schweiz. *Ergebnisse des Biodiversitäts-Monitorings Schweiz (BDM) im Überblick*. Stand: Mai 2009. *Umwelt-Zustand Nr. 0911*. Bundesamt für Umwelt (BAFU), Bern: 112 S.
- Menzi H., Haldemann C., Kessler J. 1993: Schwermetalle in Hofdüngern – Ein Thema mit Wissenslücken. *Schweiz. Landw. Forschung* 32: 159–167.
- Menzi H., Kessler J. 1998: Heavy Metal Content of Manure in Switzerland. In: Martinez J. (Hrsg.) 1998: *Proceedings of the FAO-Network on Recycling Agricultural, Municipal and Industrial Residues in Agriculture (RAMIRAN 98)*, Rennes: 495–506.
- Menzi H., Lehmann E., Kessler J. 1999: Anfall und Zusammensetzung von Hofdüngern aus der Rindviehmast. *Agrarforschung* 6: 417–420.
- Meuli R.G., Schwab P., Wächter D., Ammann S. 2014: Ergebnisse der Nationalen Bodenbeobachtung (NABO). *Zustand und Entwicklung 1985–2004*. *Umwelt-Wissen Nr. 1409*. Bundesamt für Umwelt (BAFU), Bern: 94 S.
- Morvan X. et al. 2007: Une analyse des stratégies d'échantillonnage des réseaux de surveillance de la qualité des sols en Europe. *Étude et Gestion des Sols* 14 (4): 317–325.
- Obrecht J.-M., Schlupe M. 1994: Untersuchungen über die Herkunft der Schwermetalle in den Böden am Munt la Schera im Schweizerischen Nationalpark. *ETH Zürich, Zürich*: 103 S.
- Prudente D., Baize D., Dubois J.-P. 2002: Le Cadmium naturel dans une forêt du haut Jura français. In: Baize D., Tercé M. (Hrsg.) 2002: *Les éléments traces métalliques dans les sols. Approches fonctionnelles et spatiales*. INRA, Orléans: 53–70.
- Quezada-Hinjosa R.P., Matera V., Adatte T., Rambeau C., Föllmi, K.B. 2009: Cadmium distribution in soils covering Jurassic oolitic limestone with high Cd contents in the Swiss Jura. *Geoderma* 150: 287–301.
- Reutimann J. 2006: Kupfer- und Zink-Einträge durch Rindvieh- und Schweinefutter in landwirtschaftliche Systeme. *Semesterarbeit*. ETH Zürich: 56 S.
- Schmid P., Gujer E., Zennegg M., Bucheli T.D., Desaulles A. 2005: Correlation of PCDD/F and PCB concentrations in soil samples from the Swiss soil monitoring network (NABO) to specific parameters of the observation sites. *Chemosphere* 58: 227–234.
- Schrumpf M., Schulze E.D., Kaiser K., Schumacher J. 2011: How accurately can soil organic carbon stocks and stock changes be quantified by soil inventories? *Biogeosciences* 8: 1193–1212
- Schultheiss U., Roth U., Döhler H., Eckel H. et al. 2004: Erfassung von Schwermetallströmen in landwirtschaftlichen Tierproduktionsbetrieben und Erarbeitung einer Konzeption zur Verringerung der Schwermetalleinträge durch Wirtschaftsdünger tierischer Herkunft in Agrarökosysteme. *Umweltbundesamt, Berlin*: 130 S.
- Spiess E. 2011: Nitrogen, phosphorus and potassium balances and cycles of Swiss agriculture from 1975 to 2008. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 91: 351–365.
- Studer K., Gsponer R., Desaulles A. 1995: Erfassung und Ausmass der flächenhaften Kupferbelastung in Rebbergböden der Schweiz. *Schriftenreihe der FAC-Liebefeld Nr. 20*. Eidg. Forschungsanstalt für Agrikulturchemie und Umwelthygiene (FAC), Bern: 44 S.
- Thöni L., Seitler E., Schnyder E., Ehrenmann J. 2013: Deposition von Luftschadstoffen in der Schweiz. *Moosanalysen 1990–2010*. *Umwelt-Zustand Nr. 1328*. Bundesamt für Umwelt (BAFU), Bern: 170 S.
- Tuchschnid M.P. 1995: Quantifizierung und Regionalisierung von Schwermetall- und Fluorgehalten bodenbildender Gesteine der Schweiz. *Schriftenreihe Umwelt-Materialien Nr. 32*. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), Bern: 130 S.
- USG 1983: Bundesgesetz über den Umweltschutz (Umweltschutzgesetz, USG). SR 814.01.
- VBBo 1998: Verordnung über Belastungen des Bodens (VBBo). SR 814.12
- VSBo 1986: Verordnung vom 9. Juni 1986 über Schadstoffe im Boden. Aufgehoben per 1.10.1998 durch VBBo, 1998.



# > Verzeichnisse

## Abbildungen

<b>Abb. 1</b> NABO-Probenahme bei Kiesen BE	11	<b>Abb. 13</b> Zeitreihen 1988 bis 2008 von Zn, Cu, P <sub>tot</sub> und C <sub>org</sub> am intensiv genutzten Graslandstandort Attalens	25
<b>Abb. 2</b> NABO-Dauerbeobachtungsstandorte und ihre Nutzung bei der 5. Erhebung	14	<b>Abb. 14</b> Zeitreihen 1988 bis 2008 von Zn, Cu, P <sub>tot</sub> und C <sub>org</sub> am intensiv genutzten Graslandstandort Mörschwil. (RW = Richtwert nach VBBo)	25
<b>Abb. 3</b> Probenahme der Flächenmischproben (4 Proben à je 25 Einzeleinstichen) am Standort Disentis GR sowie Einzeleinstich 0–20 cm	16	<b>Abb. 15</b> Probenahme für die Hofdüngeranalyse von landwirtschaftlichen Betrieben im NABO-Messnetz	27
<b>Abb. 4</b> Gehalte (Mittelwert mit 95 %-Vertrauensintervall) an Zn, Cu, Pb und C <sub>org</sub> von 1988 bis 2008 am Ackerbaustandort Etoy	18	<b>Abb. 16</b> Verläufe von Zn, Cu, P <sub>tot</sub> und C <sub>org</sub> am Ackerstandort Schleitheim. (RW = Richtwert nach VBBo)	28
<b>Abb. 5</b> Gehalte (Mittelwert mit 95 %-Vertrauensintervall) an Cd, Cu, Hg und C <sub>org</sub> von 1989 bis 2009 am Laubwaldstandort Rothenfluh BL (RW: VBBo-Richtwert)	18	<b>Abb. 17</b> Verläufe von Zn, Cu, P <sub>tot</sub> und C <sub>org</sub> am Ackerstandort Koppigen	29
<b>Abb. 6</b> Größenordnung der Zu- und Abnahmen für Schwermetalle im NABO-Messnetz nach 20 Jahren sowie deren Relation zum jeweiligen VBBo-Richtwert (RW)	19	<b>Abb. 18</b> Beispiel für eine vereinfachte Zinkbilanz (Durchschnitt 1996–2006) für eine Ackerbauparzelle eines gemischten Milchviehbetriebs mit mittlerer Tierdichte von 1,1 GVE/ha	30
<b>Abb. 7</b> Generelle Trends für Schwermetalle nach Landnutzung	21	<b>Abb. 19</b> Zusammenhang zwischen den Gehalten an Phosphor, Zink und Kupfer in der Gülle von 14 Landwirtschaftsbetrieben im NABO-Messnetz im Jahr 2006	31
<b>Abb. 8</b> Bodenprobenahme auf einem Graslandstandort von 10 m x 10 m in der Nähe von Trub B	22	<b>Abb. 20</b> Verläufe 1988 bis 1993 von Cd, Zn, Cu und Pb im Stadtpark Winterthur (Standort 61)	32
<b>Abb. 9</b> Zeitreihen 1989 bis 2009 von Zn, Cu, P <sub>tot</sub> und C <sub>org</sub> am intensiv genutzten Graslandstandort Tänikon. (RW = Richtwert nach VBBo)	24	<b>Abb. 21</b> Probenahme in einem Stadtpark in Winterthur	33
<b>Abb. 10</b> Zeitreihen 1989 bis 2009 von Zn, Cu, P <sub>tot</sub> und C <sub>org</sub> am intensiv genutzten Graslandstandort Ebikon	24	<b>Abb. 22</b> NABO-Probenahme in einem Hochmoor nahe St. Moritz	34
<b>Abb. 11</b> Zeitreihen 1986 bis 2006 von Zn, Cu, P <sub>tot</sub> und C <sub>org</sub> am intensiv genutzten Graslandstandort Mollis. (RW = Richtwert nach VBBo)	24	<b>Abb. 23</b> Organischer Kohlenstoff für Oberböden (0–20 cm) der NABO-Graslandstandorte (n=17)	35
<b>Abb. 12</b> Zeitreihen 1988 bis 2008 von Zn, Cu, P <sub>tot</sub> und C <sub>org</sub> am intensiv genutzten Graslandstandort Entlebuch	25	<b>Abb. 24</b> Gehalt an organischem Kohlenstoff für Oberböden (0–20 cm) der NABO-Ackerstandorte (n=29), jeweils zentriert auf den Mittelwert des Standortes	36
		<b>Abb. 25</b> Gehalt an organischem Kohlenstoff für die Oberböden (0–20 cm) zweier NABO-Ackerstandorte auf ehemals organischen Böden	36
		<b>Abb. 26</b> Gehalt an organischem Kohlenstoff für Oberböden (0–20 cm) der NABO	37

<b>Abb. 27</b> Das Raumgewicht der Feinerde bei der 4. und 5. Erhebung in Abhängigkeit des Wassergehaltes (links; n = 58 Standorte) sowie des Gehaltes an organischem Kohlenstoff (rechts; n = 42 Standorte)	39	<b>Abb. 40</b> Nickel-Gehalte 1985–2009 auf NABO-Standorten nach Landnutzung	69
<b>Abb. 28</b> NABO-Probenahme auf einem Gemüsefeld bei San Antonino TI	40	<b>Abb. 41</b> Chrom-Gehalte 1985–2009 auf NABO-Standorten nach Landnutzung	69
<b>Abb. 29</b> Gehalte im Oberboden (0–20 cm, zentriert auf den jeweiligen Mittelwert der Parzelle) von neun Graslandparzellen für Stickstoff ( $N_{\text{tot}}$ ), Phosphor ( $P_{\text{tot}}$ ) und Kalium ( $K_{\text{EDTA}}$ )	43	<b>Abb. 42</b> Cobalt-Gehalte 1985–2009 auf NABO-Standorten nach Landnutzung	70
<b>Abb. 30</b> Gehalte im Oberboden (0–20 cm, zentriert auf den jeweiligen Mittelwert der Parzelle) von sieben Ackerbauparzellen für Stickstoff ( $N_{\text{tot}}$ ), Phosphor ( $P_{\text{tot}}$ ) und Kalium ( $K_{\text{EDTA}}$ )	44	<b>Abb. 43</b> Gehalte an Organischem Kohlenstoff 1985–2009 auf NABO-Standorten nach Landnutzung	71
<b>Abb. 31</b> Säurezustand des Bodens: Zwischenresultate 2011 bis 2012 des BDM-NABO-Synergieprojektes (40 % der Z9-Standorte), ergänzt mit den Standorten der NABO-Dauerbeobachtung (Symbole mit schwarzem Rand)	46	<b>Abb. 44</b> pH-Werte 1985–2009 auf NABO-Standorten nach Landnutzung	72
<b>Abb. 32</b> Veränderung der Zn- und Cu-Gehalte unter intensiv genutztem Grasland im NABO-Messnetz	48		
<b>Abb. 33</b> Bohrkerne (0 bis 40 cm Tiefe) mit Bezeichnungen der Bodenhorizonte für die Graslandstandorte Entlebuch (intensiv genutzt; links) und Elm (extensiv genutzt)	52		
<b>Abb. 34</b> Schema für die Probenahme der Flächenmischproben 1 bis 4 sowie der vier Bohrkerne bis 40 cm Tiefe (Vierterhebung) bzw. bis 1 m Tiefe (ab der Fünfterhebung)	58		
<b>Abb. 35</b> Cadmium-Gehalte 1985–2009 auf NABO-Standorten nach Landnutzung	63		
<b>Abb. 36</b> Zink-Gehalte 1985–2009 auf NABO-Standorten nach Landnutzung	64		
<b>Abb. 37</b> Kupfer-Gehalte 1985–2009 auf NABO-Standorten nach Landnutzung	65		
<b>Abb. 38</b> Quecksilber-Gehalte 1985–2009 auf NABO-Standorten nach Landnutzung	66		
<b>Abb. 39</b> Blei-Gehalte 1985–2009 auf NABO-Standorten nach Landnutzung	67		

**Tabellen**

<b>Tab. 1</b>	Anzahl Dauerbeobachtungsstandorte NABO	15
<b>Tab. 2</b>	Beobachtete Veränderung für Schwermetallgehalte 1985–2009: Häufigkeit von Zu- und Abnahmen auf NABO-Standorten nach Landnutzung	19
<b>Tab. 3</b>	Beobachtete Veränderungen für Schwermetalle bei NABO-Graslandstandorten: Häufigkeit von Zu- und Abnahmen in Abhängigkeit der Nutzungsintensität	21
<b>Tab. 4</b>	Phosphor-, Zink- und Kupferkonzentrationen in der Gülle von 14 Landwirtschaftsbetrieben im NABO-Messnetz im Jahr 2006	26
<b>Tab. 5</b>	Dauerbeobachtungsstandorte des NABO-Messnetzes	55
<b>Tab. 6</b>	Bestimmungsgrenzen in mg/kg Trockensubstanz	60
<b>Tab. 7</b>	Kennzahlen für Cadmium	62
<b>Tab. 8</b>	Kennzahlen für Zink	64
<b>Tab. 9</b>	Kennzahlen für Kupfer	65
<b>Tab. 10</b>	Kennzahlen für Quecksilber	66
<b>Tab. 11</b>	Kennzahlen für Blei	67
<b>Tab. 12</b>	Kennzahlen für Nickel	68
<b>Tab. 13</b>	Kennzahlen für Chrom	68
<b>Tab. 14</b>	Kennzahlen für Cobalt	68
<b>Tab. 15</b>	Kennzahlen für organischen Kohlenstoff	70
<b>Tab. 16</b>	Kennzahlen für pH(CaCl <sub>2</sub> )	72

<b>Tab. 17</b>	Zu- und Abnahmen 1985–2009 an NABO-Standorten für Cadmium, Zink, Kupfer und Quecksilber	73
<b>Tab. 18</b>	Zu- und Abnahmen 1985–2009 an NABO-Standorten für Blei, Nickel, Chrom und Cobalt	73
<b>Tab. 19</b>	Richtwertüberschreitungen nach Landnutzung	74