



# Die Schweizer Bestimmungsmethoden für pflanzenverfügbare Gehalte an Phosphor, Kalium, Magnesium und Calcium im Boden

## Autorinnen und Autoren

Juliane Hirte<sup>1</sup>, Frank Liebisch<sup>1</sup>, Olivier Heller<sup>1</sup>, Peter Weisskopf<sup>1</sup>,  
Irene Weyermann<sup>2</sup>, Philipp Baumann<sup>3</sup>, Armin Keller<sup>3</sup>  
und Diane Bürge<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Agroscope

<sup>2</sup> Agridea

<sup>3</sup> Kompetenzzentrum Boden



## Impressum

---

|                 |                                                                                                                                         |
|-----------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Herausgeber     | Agroscope<br>Reckenholzstrasse 191<br><a href="http://www.agroscope.ch">www.agroscope.ch</a>                                            |
| Auskünfte       | <a href="mailto:juliane.hirte@agroscope.admin.ch">juliane.hirte@agroscope.admin.ch</a>                                                  |
| Redaktion       | Juliane Hirte                                                                                                                           |
| Gestaltung      | Müge Yildirim                                                                                                                           |
| Titelbilder     | Diane Bürge (Agroscope, Bild links)<br>Hansueli Zbinden (Agroscope, Bild Mitte)<br>Philipp Baumann (Kobo, Bild rechts)                  |
| Sprachversionen | Diese Publikation ist auch auf Französisch erschienen:<br><a href="https://doi.org/10.34776/as129f">https://doi.org/10.34776/as129f</a> |
| Copyright       | © Agroscope 2022                                                                                                                        |
| DOI             | <a href="https://doi.org/10.34776/as129g">https://doi.org/10.34776/as129g</a>                                                           |

---

### Haftungsausschluss :

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

---

## Inhalt

|                                                    |           |
|----------------------------------------------------|-----------|
| <b>Zusammenfassung</b> .....                       | <b>4</b>  |
| <b>1 Hintergrund</b> .....                         | <b>5</b>  |
| <b>2 Überblick über die Referenzmethoden</b> ..... | <b>6</b>  |
| 2.1 Probenahme .....                               | 6         |
| 2.2 Analytische Bestimmung .....                   | 6         |
| 2.3 Interpretation nach GRUD .....                 | 7         |
| <b>3 Problematik</b> .....                         | <b>8</b>  |
| 3.1 Probenahme .....                               | 8         |
| 3.2 Analytische Bestimmung .....                   | 9         |
| 3.3 Interpretation nach GRUD .....                 | 13        |
| <b>4 Lösungsansätze</b> .....                      | <b>14</b> |
| 4.1 Probenahme .....                               | 14        |
| 4.2 Analytische Bestimmung .....                   | 14        |
| 4.3 Interpretation nach GRUD .....                 | 15        |
| <b>5 Schlussfolgerungen</b> .....                  | <b>17</b> |
| <b>6 Literatur</b> .....                           | <b>19</b> |

## Zusammenfassung

Für die Charakterisierung des Nährstoffzustands von Böden für die pflanzenbauliche Nutzung können pflanzenverfügbare Gehalte an Phosphor, Kalium, Magnesium und Calcium mit verschiedenen Methoden erfasst werden. Diese Publikation gibt eine Übersicht über die in der Schweiz etablierten Methoden, von der Bodenprobenahme über Probenvorbereitung und analytische Nährstoffbestimmung bis zur Interpretation der Nährstoffgehalte im Boden nach den Grundlagen für die Düngung landwirtschaftlicher Kulturen (GRUD). Dabei werden (i) aktuell bestehende Möglichkeiten und Grenzen der Methoden beschrieben, (ii) konkrete Verbesserungsmöglichkeiten aufgezeigt und (iii) zukünftiges Entwicklungspotenzial skizziert. Diese Übersicht kann als Grundlage für die Weiterentwicklung der Bewirtschaftungsplanung in der Praxis, des agrarpolitischen Vollzuges im Rahmen des Ökologischen Leistungsnachweises (ÖLN) und des Umweltmonitorings dienen.

# 1 Hintergrund

Die Menge an pflanzenverfügbaren Nährstoffen im Boden wird an einer im Feld genommenen Bodenprobe mittels Extraktion und Messung der Nährstoffe und Interpretation der Messwerte abgeschätzt. Dabei wird nicht der Gesamtgehalt der Nährstoffe im Boden erfasst, sondern nur jener Anteil, der mit den verwendeten Extraktionsmitteln mobilisiert werden kann. Dabei ist das Ziel, die pflanzenverfügbaren Nährstoffpools bestmöglich abzubilden. Schwache Extraktionsmittel repräsentieren die Bodenlösung und mobilisieren den Anteil direkt pflanzenverfügbarer Nährstoffe. Stärkere Extraktionsmittel können längerfristig austauschbare und zum Teil im Boden fixierte Nährstoffmengen aufzeigen. Mit Hilfe von Kalibrationskurven aus Feldversuchen werden die extrahierbaren Nährstoffmengen mit der Leistung von Pflanzenbeständen, zum Beispiel mit dem Ertrag oder mit Qualitätsparametern, in Beziehung gesetzt, um Auskunft über den Nährstoffzustand des Bodens für die Pflanzenernährung zu geben. In den GRUD sind Interpretationstabellen für Phosphor, Kalium und Magnesium für verschiedene Extraktionsmethoden und Bodeneigenschaften verfügbar (Flisch et al., 2017).

Die Bestimmung der pflanzenverfügbaren Nährstoffgehalte im Boden hat damit eine besonders grosse Relevanz für die Düngeplanung. Weitere Anwendungsbereiche sind die Standortcharakterisierung, der agrarpolitische Vollzug im Rahmen des ÖLN und das Agrarumweltmonitoring (Box 1). Die Schweizer Referenzmethoden beinhalten Informationen zur Durchführung der Bodenuntersuchungen für verschiedene Anwendungsbereiche und stellen die Grundlagen für weitere Informationsquellen dar (Box 2).

Box 1: Anwendungsbereiche der Bestimmung von Phosphor, Kalium, Magnesium und Calcium im Boden.

## **Düngeplanung:**

Für die gezielte Düngeplanung sind Kenntnisse über die pflanzenverfügbaren Nährstoffe im Boden sowie über weitere Standorteigenschaften, die einen Einfluss auf die Nährstoffverfügbarkeit und das Nährstoffaneignungsvermögen der Pflanzen haben, notwendig. Gemäss GRUD können direkt pflanzenverfügbare Pools von Phosphor, Kalium und Magnesium, sowie Reservepools von Phosphor, Kalium, Magnesium und Calcium bestimmt werden. Für die Ableitung der Düngeempfehlung müssen weiterhin Informationen zum pH-Wert, zur Körnung (Textur: Ton- und Schluffgehalt) und zum organischen Kohlenstoffgehalt (bzw. Humus) im Boden vorliegen. Alternative Düngungskonzepte wie Kinsey oder Niederhäuser berücksichtigen ausserdem das Verhältnis der basischen Kationen im Boden und die Gehalte weiterer essentieller Pflanzennährstoffe wie Schwefel, Eisen, Mangan und Bor.

## **Ökologischer Leistungsnachweis für die Ausrichtung von Direktzahlungen:**

Als Voraussetzung für die Ausrichtung von Direktzahlungen müssen im Rahmen des ÖLN mindestens alle 10 Jahre auf jeder Parzelle Bodenuntersuchungen durchgeführt werden. Die obligatorisch zu erhebenden Parameter sind Phosphor und Kalium. Um diese interpretieren zu können, müssen auch der pH-Wert, die Körnung und der organische Kohlenstoffgehalt bestimmt werden. Die anonymisierten Daten werden jährlich durch zugelassene Umweltlabore an das BLW für die Auswertung der Entwicklung des Phosphor- und Kaliumzustands der Böden geliefert. Die termingerechte Datenlieferung durch die Labore ist eine Voraussetzung für die Neu-Zulassung.

## **Agrarumweltmonitoring:**

Die ÖLN-Bodenuntersuchungsdaten werden weiterhin für die Berechnung des Agrarumweltindikators «Phosphor im Boden» verwendet. Hierfür werden derzeit die pflanzenverfügbaren Phosphorpools berücksichtigt. Um das Verlagerungsrisiko von Phosphor aus dem Boden in Gewässer aufgrund von Bodenerosion, Abschwemmung und Auswaschung abzuschätzen, wären zusätzliche Informationen zum Phosphor-Totalgehalt im Boden, zum Erosionsrisiko und zur Drainagen-Anbindung der Parzelle notwendig.

Box 2: Informationsquellen zu den Bestimmungsmethoden für pflanzenverfügbare Gehalte an Phosphor, Kalium, Magnesium und Calcium im Boden mit Herausgeber/in, Jahr und Weblink.

#### Grundlagen:

- **Schweizer Referenzmethoden.** Agroscope und andere. Laufende Überarbeitung. [www.agroscope.ch/referenzmethoden](http://www.agroscope.ch/referenzmethoden)
- **Grundlagen für die Düngung landwirtschaftlicher Kulturen (GRUD).** Agroscope. 2017. [www.grud.ch](http://www.grud.ch)

#### Verordnungen und Richtlinien:

- **Direktzahlungsverordnung (DZV).** Bundesamt für Landwirtschaft (BLW). 2013. Weisungen und Erläuterungen 2021. [www.blw.admin.ch/blw/de/home/instrumente/direktzahlungen.html](http://www.blw.admin.ch/blw/de/home/instrumente/direktzahlungen.html)
- **KIP-Richtlinien für den ÖLN.** Koordinationsgruppe Richtlinien Tessin und Deutschschweiz. 2021. <https://agridea.abacuscity.ch/de/A~1214~1/3~428200~Shop/Publikationen/Aufzeichnungen-Nachweis/%C3%96kologischer-Leistungsnachweis-%C3%96LN/KIP-Richtlinien-Vollversion/Deutsch/Print-Papier>
- **Prestations écologiques requises (PER) règles techniques.** Groupement pour la production intégrée dans l'Ouest de la Suisse (PIOCH) und AGRIDEA. 2021. [agripedia.ch/per/dossier-per-romandie-2021/](http://agripedia.ch/per/dossier-per-romandie-2021/)

#### Protokolle und Merkblätter:

- **Protokolle der Umweltlabore und Lohnunternehmen.** Diverse (siehe Tabelle 2).
- **Merkblatt Bodenuntersuchungen für Biobetriebe.** Forschungsinstitut für biologischen Landbau FiBL. 2021. [www.fibl.org/de/shop/1158-bodenuntersuchung](http://www.fibl.org/de/shop/1158-bodenuntersuchung)
- **Merkblatt Guide de prélèvements pour analyses de terre.** AGRIDEA, Agroscope, BLW. In Arbeit.

## 2 Überblick über die Referenzmethoden

### 2.1 Probenahme

Gemäss Schweizer Referenzmethoden (Box 3) werden die Bodenproben nach der Ernte oder dem letzten Schnitt, also in der Regel im Herbst, und möglichst immer nach demselben Fruchtfolgeglied genommen. Die Beprobungseinheit ist eine einheitlich bewirtschaftete Fläche und entspricht normalerweise einer Parzelle. Es gibt keine Mindest- oder Maximalflächengrösse, jedoch sollen bei uneinheitlichen Bodenverhältnissen oder offensichtlichen Unterschieden im Wachstum der Pflanzen zwei oder mehr Beprobungseinheiten pro Parzelle festgelegt werden. Für die Probenahme werden ein zylindrischer Probenstecher mit geringem Durchmesser (2-4 cm) und ein Auffanggefäss benötigt. Neben der manuellen Methode mit Bohrstock und Eimer finden derzeit auch standardisierte, teilweise maschinelle Probenahmemethoden wie zum Beispiel mit dem Swiss Sampler (LBU) oder hydraulischen Bodenprobenbohrern ([boden-analyse.ch](http://boden-analyse.ch), [bodenproben.ch](http://bodenproben.ch), Landor) Anwendung. Pro Beprobungseinheit werden 20-25 Einstiche in 0-10 cm (Grasland) oder 0-20 cm (Ackerkulturen) Bodentiefe an gleichmässig verteilten Stellen genommen, im Auffanggefäss zu einer Mischprobe vereinigt und in einen sauberen Probensack überführt. Der eindeutig beschriftete Probensack soll möglichst rasch ins Labor gesendet werden.

### 2.2 Analytische Bestimmung

Für die analytische Bestimmung der Nährstoffgehalte werden die Bodenproben bei 40°C getrocknet und auf 2 mm gesiebt, um organisches Material wie Wurzeln und Hofdüngerrückstände sowie Steine zu entfernen. In der Schweiz sind als schwache Extraktionsmittel CO<sub>2</sub>-gesättigtes Wasser (CO<sub>2</sub>), Calciumchlorid-Lösung (CC) und Wasser (H<sub>2</sub>O<sub>10</sub>) etabliert, als stärkeres Extraktionsmittel Ammoniumacetat-EDTA (AAE10). Die Wahl der Methode hängt von der Kulturgruppe, dem Nährstoff und dem zu extrahierenden Nährstoffpool ab (Tabelle 1). In den Extrakten

werden die Gesamtgehalte an Kalium, Magnesium und Calcium, sowie der mineralische Anteil von Phosphor gemessen. Für die Interpretation der Nährstoffkonzentrationen in den Extrakten gemäss GRUD sind weitere Informationen über den Boden nötig: pH-Wert, Körnung und organischer Kohlenstoffgehalt. Der pH-Wert wird in Wasser gemessen, die Körnung wird mit der Sedimentationsmethode und der organische Kohlenstoffgehalt mit der Dichromat- oder Temperaturgradientenmethode bestimmt. Alternativ steht die Fühl-/Sichtprobe für die Abschätzung der Körnung und des organischen Kohlenstoffgehalts in der Düngeberatung und für ÖLN-Bodenuntersuchungen zur Verfügung.

Box 3: Die Schweizer Referenzmethoden im Überblick.

**Referenzstatus:**

Das Ziel der Referenzmethodensammlung ist es, verbindliche Methoden für die Düngeberatung und diverse Vollzugsaufgaben bereitzustellen. Eine Methode hat Referenzstatus, wenn sie für einen bestimmten Einsatzbereich definiert und validiert ist und Interpretationsschemata für die Resultate zur Verfügung stehen. Gut definierte und dokumentierte Methoden gewährleisten die Rückverfolgbarkeit von Resultaten über lange Zeiträume, sowie die Vergleichbarkeit von Resultaten verschiedener Labore.

**Anwendungsbereiche:**

- Nährstoffanalysen für die Düngeberatung und den ÖLN
- Beurteilung der Schadstoffe in Boden- und Düngerproben (gemäss Verordnung über Belastungen des Bodens VBBö, Chemikalien-Risikoreduktionsverordnung ChemRRV und Düngerbuch-Verordnung DüBV)

**Äquivalenz- und Forschungsmethoden:**

Methoden, die erwiesenermassen gleiche Resultate liefern wie die Referenzmethoden, können ebenso eingesetzt werden. Sie geben den Laboren eine grössere Flexibilität und können kostengünstigere Messungen und eine grössere Vergleichbarkeit mit internationalen Daten ermöglichen. Als Beweis der Äquivalenz gilt das Bestehen des dazu passenden Ringversuches.

Methoden, die in den gleichen Anwendungsbereichen einsetzbar sind, jedoch keinen Referenzstatus haben, werden als Forschungsmethoden publiziert.

**Veröffentlichung:**

Die Methoden werden seit 1995 veröffentlicht. Sie wurden im Jahr 2020 überarbeitet und stehen unentgeltlich, öffentlich und in elektronischer Form zur Verfügung ([www.agroscope.ch/referenzmethoden](http://www.agroscope.ch/referenzmethoden)). Die Erstellung, Revision und Publikation der Methoden erfolgt mit Vertretern von Agroscope, BLW, Bundesamt für Umwelt (BAFU) und anderen Institutionen und Fachstellen, sowie Vertretern von Umweltlaboren. Änderungen werden vorzeitig im «Newsletter Referenzmethoden» angekündigt (Anmeldung für alle Interessierten via Internetseite).

## 2.3 Interpretation nach GRUD

Um den Nährstoffzustand des Bodens einzuschätzen, werden die gemessenen Nährstoffkonzentrationen in den Extrakten mit Hilfe von Interpretationstabellen eingeordnet (Flisch et al., 2017). Die wichtigste Zusatzinformation liefert der Tongehalt, welcher in die fünf Klassen <10, 10-19.9, 20-29.9, 30-39.9, und  $\geq 40\%$  eingeteilt wird und zusammen mit der Nährstoffkonzentration im Extrakt Auskunft über den Nährstoffzustand des Bodens gibt. Der Nährstoffzustand wird als arm, mässig, genügend, vorrätig oder angereichert beurteilt und damit in die Versorgungsklassen A bis E eingeteilt (Tabelle 8 in Flisch et al., 2017). Um den Düngebedarf zu ermitteln, wird die Normdüngung mit Korrekturfaktoren entsprechend dem Nährstoffzustand des Bodens multipliziert. Der maximale Korrekturfaktor ist 1.5 für Böden mit armem Nährstoffzustand, der minimale Korrekturfaktor ist 0 für Böden mit angereichertem Nährstoffzustand. Ein Korrekturfaktor von 1 entspricht der Norm- oder Erhaltungsdüngung. Weist der Boden einen organischen Kohlenstoffgehalt von  $\geq 5.8\%$  (Humusgehalt  $\geq 10\%$ ) auf, so wird zusätzlich eine Humuskorrektur angewendet (Tabelle 9 in Flisch et al., 2017). Die Interpretationstabelle für Phosphor im CO<sub>2</sub>-Extrakt berücksichtigt zudem auch die Schluff- und Sandgehalte des Bodens (Tabelle 10 in Flisch et al., 2017). Derzeit liegen

keine Interpretationstabellen für Phosphor im H<sub>2</sub>O<sub>10</sub>-Extrakt für Böden mit einem pH-Wert von ≤ 5.0 oder ≥ 7.8 vor. Für kalkhaltige Böden (pH ≥ 6,8 oder AAE10-Ca ≥ 4000 mg Ca/kg Boden) sind die Interpretationstabellen für Phosphor im AAE10-Extrakt ebenfalls ungültig (Tabelle 1). Grund dafür ist, dass grössere Mengen an Calcium im Boden die chemischen Prozesse während der Phosphor-Extraktion mit AAE10 verändern und derzeit nicht genügend Daten existieren, um pH-Wert-abhängige Ertragsreaktionskurven für Phosphor im AAE10-Extrakt abzuleiten.

Tabelle 1: Übersicht über die Extraktionsmethoden für die Bestimmung von Phosphor, Kalium, Magnesium und Calcium im Boden gemäss Schweizer Referenzmethoden.

| Extraktionsmittel              |         | Nährstoff                            | Nährstoffpool            | Kulturgruppe                                | Interpretierbarkeit                 | Methoden-Code                      |                                                                         |
|--------------------------------|---------|--------------------------------------|--------------------------|---------------------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|
| Bezeichnung                    | Stärke* |                                      |                          |                                             |                                     | Extraktion                         | Messung                                                                 |
| CO <sub>2</sub>                | schwach | Phosphor, Kalium                     | direkt pflanzenverfügbar | Ackerkulturen, Grasland                     | keine Einschränkungen               | CO <sub>2</sub> -Ex                | CO <sub>2</sub> -K, CO <sub>2</sub> -P                                  |
| CC                             | schwach | Magnesium                            | direkt pflanzenverfügbar | Ackerkulturen, Grasland                     | keine Einschränkungen               | CCMg-Ex                            | CC-Mg                                                                   |
| H <sub>2</sub> O <sub>10</sub> | schwach | Phosphor, Kalium, Magnesium          | direkt pflanzenverfügbar | Spezialkulturen: Gemüse, Obst, Beeren, Wein | Phosphor: Boden-pH ≥ 5.0 und ≤ 7.8  | H <sub>2</sub> O <sub>10</sub> -Ex | H <sub>2</sub> O <sub>10</sub> -K-Mg, H <sub>2</sub> O <sub>10</sub> -P |
| AAE10                          | stark   | Phosphor, Kalium, Magnesium, Calcium | Reserve                  | alle                                        | Phosphor, Magnesium: Boden-pH ≤ 6.8 | AAE10-Ex                           | AAE10-K-Ca-Mg, AAE10-P                                                  |

\* In den GRUD als «mild» bzw. «aggressiv» eingeordnet.

## 3 Problematik

### 3.1 Probenahme

Für die Methodik der Probenahme bestehen Unklarheiten, da es heute unterschiedliche Informationsquellen mit uneinheitlichen oder zum Teil fehlenden Informationen gibt. Während die Anforderungen an die Repräsentativität der Fläche und die Empfehlungen für den Probenahmezeitpunkt und das Zeitintervall in verschiedenen Quellen ähnlich sind, variieren die Angaben zu Probenahmetiefe im Oberboden, Durchmesser des Probenstechers, Anzahl der Einstiche pro Beprobungseinheit, Grösse der Beprobungseinheit und Teilung der Mischprobe vor dem Einsenden ins Labor deutlich (Tabelle 2).

Gemäss Referenzmethoden ist die Obergrenze der Bodenprobe für die meisten Kulturen auf 0 cm festgelegt, während in der Westschweiz das Verwerfen der oberen 2 cm der Bodenprobe aufgrund möglicher Kontamination durch aufliegende Düngemittelreste oder Ernterückstände generell empfohlen wird (Tabelle 2). Für wenig mobile Nährstoffe wie Phosphor, deren Konzentration mit der Bodentiefe oft stark abnehmen, kann dies Auswirkungen auf die gemessenen Gehalte in der Bodenprobe haben. Ausserdem gibt es derzeit ausser für den Obst- und Rebbau keine Empfehlungen zum Umgang mit dem Unterboden, obwohl Kulturpflanzen im Durchschnitt mehr als 30% ihres Nährstoffbedarfs aus dem Unterboden abdecken (Kautz et al., 2013).

Der Durchmesser des Probenstechers und die Anzahl und räumliche Verteilung der Einstiche beeinflussen sowohl die Repräsentativität der Mischprobe für die Beprobungseinheit als auch die genommene Bodenmenge und die Notwendigkeit zur Teilung der Mischprobe vor dem Einsenden ins Labor. Hier sind bereits die Informationen in den Referenzmethoden widersprüchlich: Es sollen mindestens 20 Einstiche mit einem Probenstecher mit 2-4 cm Durchmesser genommen werden, was in einer Probenmenge von 1.3-5 L oder ca. 1.6-6.5 kg (angenommene Bodendichte von 1.3 g cm<sup>-3</sup>) resultiert. Obwohl angestrebt wird, die Teilung der Mischprobe zu vermeiden, soll aufgrund von Kapazitätsbeschränkungen nur max. 1 kg Bodenmenge für die Analyse ins Labor gesendet werden. Dementsprechend weichen die Informationen der Labore bezüglich Anzahl Einstiche und Teilung der Mischprobe grösstenteils von den Referenzmethoden ab (Tabelle 2). Genaue Angaben zur methodisch korrekten Teilung einer Mischprobe fehlen allerdings in den meisten Informationsquellen, was für die Entnahme einer repräsentativen Teilmischprobe insbesondere bei lehmigen oder tonreichen Böden problematisch sein kann. Ebenso fehlen in den

Referenzmethoden Angaben zu obligatorischen Zusatzinformationen zur beprobten Fläche wie zum Beispiel Probenahmedatum, Betrieb, Flächenzuordnung, Kultur(gruppe) und Probenahmetiefe, so dass sich auch hier die Vorgehensweisen zwischen verschiedenen Laboren stark unterscheiden (Tabelle 2). Wenn zum Beispiel die Angaben zur Kultur fehlen, können Düngeempfehlungen nicht korrekt abgeleitet werden, da für Phosphor, Kalium und Magnesium kulturspezifische Korrekturfaktoren angewandt werden.

Für den ÖLN gelten die Angaben in den Referenzmethoden und zusätzlich die Vorgabe, dass die Bodenuntersuchungen mindestens alle 10 Jahre durchgeführt werden müssen (BLW, 2020). Mehrere nebeneinander liegende Parzellen mit gleichen Bodenbedingungen und gleicher Bewirtschaftung können bei der Probenahme zusammengefasst werden. Diese Angaben sind auch in den KIP Richtlinien bzw. PER règles techniques aufgeführt (KIP, 2021; PIOCH, 2021). Zusätzlich gilt gemäss KIP-Richtlinien die Untersuchungspflicht nur für Parzellen > 1 ha, während Parzellen > 5 ha in mehrere Beprobungseinheiten unterteilt werden sollen (KIP, 2021), was jedoch nicht durch die DZV gestützt ist. Da relativ viele Parzellen in der Schweiz kleiner als 1 ha sind, können inkonsistente Angaben zur Untersuchungspflicht bei Betriebsleitenden zu Unklarheiten bezüglich der Umsetzung der ÖLN-Bodenuntersuchungen führen.

Für die Nutzung der Analyseergebnisse in Vollzugs- und Planungsinstrumenten (z.B. Bewirtschaftungs- und Landnutzungsplanung) wäre ausserdem die eindeutige Zuordnung der Beprobungseinheit zu einer Fläche durch Geo-Referenzierung notwendig. Um das Verlagerungsrisiko von Phosphor aus dem Boden in Gewässer aufgrund von Bodenerosion, Abschwemmung und Auswaschung für das Agrarumweltmonitoring abzuschätzen, sind Informationen zum Erosionsrisiko und zur Drainagen-Anbindung notwendig. Diese Informationen wurden bereits schweizweit modelliert (Bircher et al., 2019; Koch and Prasuhn, 2020), können jedoch aufgrund fehlender Flächenzuordnung der Analyseergebnisse derzeit nicht mit den ÖLN-Bodenuntersuchungen verknüpft werden.

## 3.2 Analytische Bestimmung

Bei den schwachen Extraktionsmethoden sind CO<sub>2</sub> und CC nur für die Kulturgruppen Ackerkulturen und Grasland, H<sub>2</sub>O<sub>10</sub> nur für Spezialkulturen etabliert (Tabelle 1; Flisch et al., 2017). Für diese Einteilung der Kulturgruppen gibt es jedoch keine wissenschaftliche Grundlage, so dass Kulturen wie Kartoffeln, Eiweisserbsen oder Ackerbohnen je nach Anbauform sowohl den Ackerkulturen als auch dem Gemüsebau zugeordnet werden und die Böden dementsprechend sowohl mit der CO<sub>2</sub>- / CC- als auch mit der H<sub>2</sub>O<sub>10</sub>-Methode analysiert werden. Trotz Unterschieden zwischen den Methoden im Boden-Wasser-Verhältnis, in der Schüttelzeit und in der Filtration ist die Grössenordnung der extrahierten Nährstoffe ähnlich (Stünzi, 2006, 2007). Einfache Umrechnungen sind dennoch nicht in jedem Fall möglich, da die Korrelationen von weiteren Bodeneigenschaften wie dem Kalkgehalt oder dem Gehalt an organischer Substanz beeinflusst werden (Stünzi, 2006, 2007). Dies beeinträchtigt die Vergleichbarkeit der Nährstoffgehalte im Boden zwischen verschiedenen Kulturgruppen und erschwert die Auswertung der ÖLN-Bodenanalysedaten. Vergleiche mit internationalen Studien für die Kulturgruppen Ackerkulturen und Grasland sind ebenfalls kaum möglich (Steinforth et al., 2021), da die CO<sub>2</sub>-Methode ausschliesslich in der Schweiz angewandt wird. In der Schweizer Forschung werden oftmals noch weitere Extraktionsmethoden wie die Olson- oder Natriumhydrogencarbonat-Methode genutzt (z. B. Demaria et al., 2005; Banerjee et al., 2019). Eine einheitliche schwache Bestimmungsmethode für alle Kulturgruppen, welche auch ausserhalb der Schweiz Verwendung findet, wäre sowohl für das Umweltmonitoring und die Vollzugsunterstützung als auch für die Forschung sinnvoll.

Tabelle 2: Informationen zur Probenahme des Oberbodens im Freiland gemäss Schweizer Referenzmethoden und Informationsquellen der für die ÖLN-Bodenuntersuchungen zugelassenen Umweltlabore.

|                                                | Referenz-<br>methoden /<br>GRUD   | Arenenberg                                                                                  | bodenproben.ch                            | Landor                                                                          | Hepia                                     | Labor Ins                                               | LBU                                                          | Sol Conseil                                       |
|------------------------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|---------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|
| Methode                                        | manuell                           | manuell oder<br>maschinell über<br>bodenproben.ch                                           | maschinell                                | manuell,<br>manuell<br>standardisiert<br>oder maschinell                        | manuell                                   | manuell oder<br>maschinell über<br>Partner              | manuell<br>standardisiert<br>oder maschinell<br>über Partner | manuell oder<br>maschinell über<br>bodenproben.ch |
| Materialien                                    | Bohrstock, Eimer                  | Bohrstock oder<br>Probenstecher,<br>Eimer                                                   | Wintex-Stecher                            | Bohrstock,<br>Eimer, Swiss<br>Sampler oder<br>LANDOR-<br>Bodenproben-<br>bohrer | Bohrstock oder<br>Probenstecher,<br>Eimer | Bohrstock,<br>Eimer oder<br>maschineller<br>Probebohrer | Swiss Sampler<br>oder<br>maschineller<br>Probebohrer         | Bohrstock /<br>Spaten, Eimer                      |
| Anforderungen an<br>Beprobungseinheit          | einheitliche<br>Fläche            | einheitliche<br>Fläche                                                                      | einheitliche<br>Fläche, max. 5 ha         | einheitliche<br>Fläche, max. 1.5<br>ha                                          | einheitliche<br>Fläche                    | k. A.                                                   | einheitliche<br>Fläche                                       | k. A.                                             |
| Zeitpunkt                                      | zwischen Ernte<br>und Düngung     | nach Ernte, vor<br>Düngung der<br>Folgekultur,<br>mind. 6 Wochen<br>nach letzter<br>Düngung | nach Ernte oder<br>im Winter              | vor Düngung                                                                     | vor Düngung und<br>Boden-<br>bearbeitung  | k. A.                                                   | k. A.                                                        | nach Ernte,<br>mind. 2 Monate<br>nach Düngung     |
| Zeitintervall [Jahre]                          | abhängig von<br>Kultur 4-6 / 5-10 | Düngeplanung:<br>4-6 / 5-10, ÖLN:<br>mind. alle 10                                          | Empfehlung: 4-6,<br>ÖLN: mind. alle<br>10 | 4-6                                                                             | ÖLN: mind. alle<br>10                     | abhängig von<br>Kultur 4-6 / 5-10                       | k. A.                                                        | k. A.                                             |
| Bodentiefe [cm]                                |                                   |                                                                                             |                                           |                                                                                 |                                           |                                                         |                                                              |                                                   |
| Ackerkulturen                                  | 0-20                              | 0-20                                                                                        | 0-20                                      | 0-20                                                                            | 2-20 <sup>1</sup>                         | 0-20                                                    | 0-20                                                         | 2-20                                              |
| Naturwiesen und<br>Weiden                      | 0-10                              | 0-10                                                                                        | 0-10                                      | 0-10                                                                            | k. A.                                     | 0-10                                                    | 0-10                                                         | 2-10                                              |
| Gemüsebau                                      | 0-20                              | 0-20                                                                                        | 0-20                                      | 2-25                                                                            | k. A.                                     | 0-25                                                    | 0-25                                                         | 2-20                                              |
| Obst- und Rebbau                               | 2-25                              | 2-25                                                                                        | 2-25                                      | 2-25                                                                            | k. A.                                     | 2-25                                                    | 0-25                                                         | 2-25                                              |
| Beerenbau ein- /<br>mehrjährig                 | 0-20 / 2-25                       | 0-20 / 2-25                                                                                 | 0-20 / 2-25                               | 2-25                                                                            | k. A.                                     | 0-20 / 2-25                                             | k. A.                                                        | k. A.                                             |
| Durchmesser<br>Probenstecher /<br>-bohrer [cm] | 2-4                               | ca. 2                                                                                       | 1.8                                       | ca. 3-4                                                                         | 2.5                                       | 3                                                       | ca. 3                                                        | k. A.                                             |
| Anzahl Einstiche                               | 20-25                             | 20-25                                                                                       | 20-25                                     | 20-30                                                                           | 20                                        | 20                                                      | 15-20                                                        | 12-15                                             |
| Verteilung Einstiche                           | gleichmässig                      | gleichmässig<br>(diagonal, quer,<br>Testfläche)                                             | im Raster                                 | diagonal                                                                        | gleichmässig<br>(diagonal, quer)          | diagonal                                                | diagonal                                                     | gleichmässig<br>(quer, diagonal)                  |

|                           |                                |                                                                            |                                                 |                                         |                                                                            |                                                                  |                                                                                         |                                                                         |
|---------------------------|--------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|-----------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|
| Bodenmenge für Labor [kg] | 1                              | 0.5                                                                        | 0.5                                             | 0.5                                     | 1                                                                          | 1 Liter                                                          | 0.3                                                                                     | 1                                                                       |
| Teilung der Mischprobe    | möglichst komplette Mischprobe | Einstiche zerbröckeln und gut durchmischen, Menge der Mischprobe entnehmen | komplette Mischprobe                            | Menge der Mischprobe entnehmen          | Einstiche zerbröckeln und gut durchmischen, Menge der Mischprobe entnehmen | Menge der Mischprobe entnehmen                                   | Probenmaterial im Eimer mit Probenbohrer gut vermischen, Menge der Mischprobe entnehmen | k. A.                                                                   |
| Zusatzinformation         | k. A.                          | Name Parzelle, Datum                                                       | Name (und Grösse) Parzelle, Kulturgruppe, Datum | Name und Grösse Parzelle, Kultur, Datum | Name Parzelle, Kulturgruppe, Bodentiefe, Datum                             | Höhe Betrieb, Name und Grösse Parzelle, Kultur, Vorkultur, Datum | Name und Grösse Parzelle, Kulturgruppe, Kultur, Datum                                   | Name Parzelle, Bodentiefe, Kulturgruppe, Körnung (falls bekannt), Datum |
| Referenz <sup>2</sup>     | 3                              | 4                                                                          | 5                                               | 6                                       | 7                                                                          | 8                                                                | 9                                                                                       | 10                                                                      |

<sup>1</sup> Die empfohlene Probenahmetiefe ist 0-20 cm, wobei die oberen 2 cm verworfen werden sollen.

<sup>2</sup> Alle Informationen entstammen online verfügbaren Informationsquellen und wurden nach persönlicher Kommunikation mit den Laborleitenden ergänzt.

<sup>3</sup> [www.agroscope.ch/referenzmethoden](http://www.agroscope.ch/referenzmethoden); [www.grud.ch](http://www.grud.ch)

<sup>4</sup> [arenenberg.tg.ch/beratung/bodenlabor.html/350](http://arenenberg.tg.ch/beratung/bodenlabor.html/350)

<sup>5</sup> [bodenproben.ch](http://bodenproben.ch)

<sup>6</sup> [www.landor.ch/landor-services/beratung/boden-und-blattanalysen/](http://www.landor.ch/landor-services/beratung/boden-und-blattanalysen/)

<sup>7</sup> [www.hesge.ch/hepia/en/laboratoire/soil-analysis-laboratory](http://www.hesge.ch/hepia/en/laboratoire/soil-analysis-laboratory)

<sup>8</sup> [www.laborins.ch/service/bodenproben/](http://www.laborins.ch/service/bodenproben/); Partner: [www.boden-analyse.ch](http://www.boden-analyse.ch); [www.agrischenk.ch/dienstleistungen/bodenanalyse/](http://www.agrischenk.ch/dienstleistungen/bodenanalyse/); [www.vetterli-foma.ch/bodenproben/](http://www.vetterli-foma.ch/bodenproben/); [www.schneider-thunstetten.ch/maschinelle-bodenprobe/](http://www.schneider-thunstetten.ch/maschinelle-bodenprobe/); [www.pe-briner.ch/Landwirtschaftliche Dienstleistungen/Maschinelle-Bodenproben/](http://www.pe-briner.ch/Landwirtschaftliche_Dienstleistungen/Maschinelle-Bodenproben/); [www.rsahli-agrar.ch/roland/index.php/de/unsere-programme/bodenanalyse](http://www.rsahli-agrar.ch/roland/index.php/de/unsere-programme/bodenanalyse)

<sup>9</sup> [www.ericsschweizer.ch/de/labor/bodenanalytik](http://www.ericsschweizer.ch/de/labor/bodenanalytik); Partner: [www.boden-analyse.ch](http://www.boden-analyse.ch)

<sup>10</sup> [www.sol-conseil.ch](http://www.sol-conseil.ch)

Die Bestimmung der Nährstoffe in den Extrakten erfolgt mit unterschiedlichen Messmethoden. Die Wahl der Messmethode ist für die Bestimmung von Kalium, Magnesium und Calcium unbedeutend; bei Phosphormessungen hingegen beeinflusst die Methode die Reproduzierbarkeit und Vergleichbarkeit der Ergebnisse erheblich (Stünzi, 2006). Mittels Photometrie wird im Wesentlichen der mineralische Anteil des Phosphors im Extrakt erfasst, während bei der spektrometrischen Messung auch der organisch gebundene Phosphor gemessen wird. Da dieser in der Pflanzenernährung eine wichtige Rolle spielt (Richardson et al., 2005) liegt es nahe, für die Düngeberatung den totalen Phosphorgehalt im Extrakt zu bestimmen. Die spektrometrische Messung hat ausserdem den Vorteil, dass gleichzeitig mehrere Elemente im Extrakt bestimmt werden können. Derzeit existieren jedoch noch keine Referenzmethode und Interpretationstabellen für spektrometrisch gemessenen Phosphor.

Für die Bestimmung der Körnung und des organischen Kohlenstoffgehalts, welche für die Interpretation der Nährstoffgehalte im Boden notwendig sind, steht als Alternative zur analytischen Bestimmung die Fühl- / Sichtprobe sowohl für die Düngeempfehlung als auch für die ÖLN-Bodenuntersuchung zur Verfügung. Die Ungenauigkeit dieser Methode (Abbildung 1) kann gravierende Auswirkungen auf die Beurteilung des Nährstoffzustandes eines Bodens und die Korrekturfaktoren für die Düngeempfehlung haben. Wenn zum Beispiel der Tongehalt geringfügig falsch geschätzt und eine Klasse zu niedrig eingestuft wird, kann in manchen Fällen der Nährstoffzustand als mässig (B) anstelle von angereichert (E) eingeordnet und der Korrekturfaktor somit von 0 auf 1.2 verschoben werden (Tabelle 16 Rebbau in Flisch et al., 2017). Daher ist die Fühl- / Sichtprobe für agronomische Empfehlungen und für die Vollzugsunterstützung nicht geeignet.

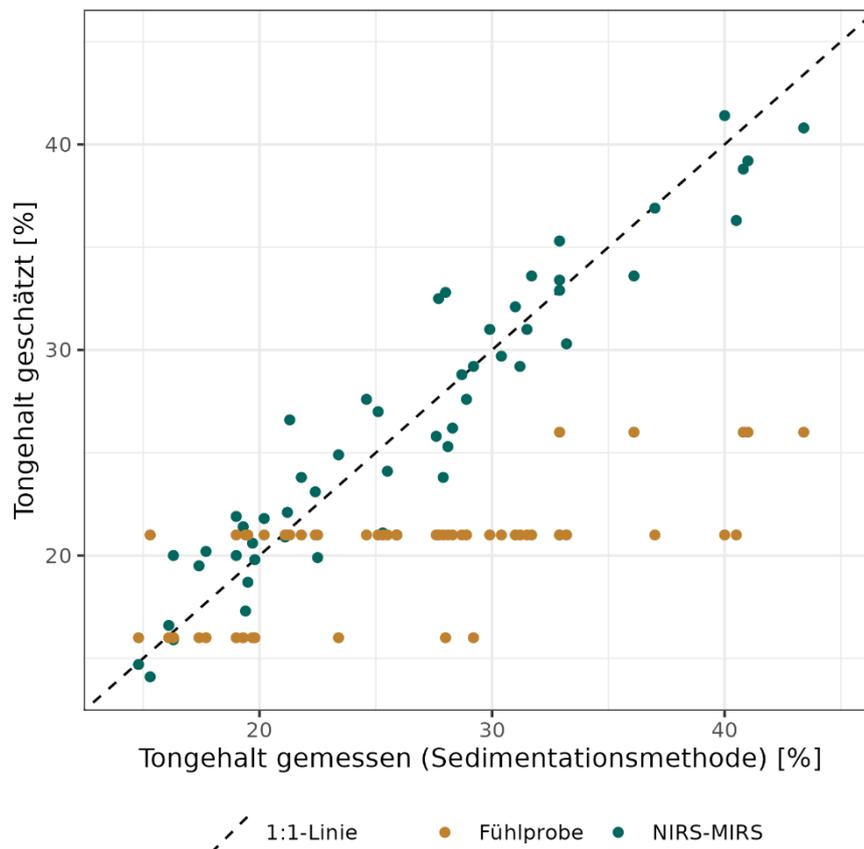


Abbildung 1: Beziehung zwischen gemessenem (Sedimentationsmethode) und geschätztem (Fühlprobe und Spektroskopie im nahen und mittleren Infrarot-Bereich (NIRS-MIRS)) Tongehalt von 53 Bodenproben, welche von elf Praxisparzellen im Kanton Zürich stammen und im Rahmen des ESA-Projekts «SolumScire» genommen wurden (<https://business.esa.int/projects/solumscire-sc>). Da sowohl für die Düngeberatung als auch für die Interpretation der ÖLN-Bodenuntersuchungsdaten der Tongehalt in Klassen (<10%, 10-19.9%, usw.) eingeteilt wird, wären für diese Anwendungsbereiche klassen-präzise Angaben hinreichend. In dieser Studie weichen die mit der Fühlprobe geschätzten Tongehalte allerdings bis zu zwei Klassen vom gemessenen Tongehalt ab.

### 3.3 Interpretation nach GRUD

Phosphor im H<sub>2</sub>O<sub>10</sub>-Extrakt und Phosphor und Magnesium im AAE10-Extrakt sind derzeit nur für definierte Boden-pH-Bereiche interpretierbar (Tabelle 1). Dies betrifft für Phosphor ca. 20% der H<sub>2</sub>O<sub>10</sub>- und ca. 40% der AAE10-Resultate (Abbildung 2). Zum einen ergibt sich daraus eine grosse Anfälligkeit für Falschinterpretationen und fehlerhafte Düngeempfehlungen, zum anderen werden die Potentiale der Bestimmungsmethoden nicht ausgeschöpft und Laborressourcen ineffizient genutzt.

Die Interpretation der Nährstoffgehalte im Boden für den Düngebedarf ist von verschiedenen Boden- und Klimateigenschaften eines Standorts abhängig. Die GRUD-Interpretationstabellen beinhalten derzeit als zusätzliche erklärende Variable für den Versorgungszustand des Bodens vor allem den Tongehalt. Obwohl der organische Bodenkohlenstoff bereits bei Gehalten von 1.5–2.5% einen grossen Einfluss auf die Nährstoffverfügbarkeit von Böden und die Nährstoffaneignung von Pflanzen hat (Johnston et al., 2014), wird er für die Ableitung der Düngeempfehlung in den GRUD erst ab einem organischen Kohlenstoffgehalt von > 5.8% berücksichtigt. Für Ackerstandorte, deren organischer Kohlenstoffgehalt im Boden in der Regel weit unter diesem Wert liegt, wird die Düngeempfehlung dementsprechend nicht angepasst. Ebenso beeinflussen der Boden-pH-Wert und klimatische Standorteigenschaften die Ertragsreaktionen auf verfügbare Nährstoffe im Boden und damit den Düngebedarf (Abbildung 3a und 3b; Hirte et al., 2021). Diese Zusammenhänge werden bei der Interpretation momentan ebenfalls nicht berücksichtigt.

Die Abstufungen der Phosphorgehaltsklassen in den Interpretationstabellen scheinen für die CO<sub>2</sub>-Methode zu grob, insbesondere am unteren Ende der Skala, für die AAE10-Methode dagegen zu fein, um den Nährstoffzustand des Bodens hinsichtlich der Ertragsreaktion der Pflanzen hinreichend genau einzuschätzen (Hirte et al., 2021). Zusätzlich suggeriert die Anzahl an Nachkommastellen der Nährstoffgehalte vor allem in den Tabellen für die CO<sub>2</sub>-Methode eine höhere Messgenauigkeit, als es in der Realität möglich ist. Darüber hinaus kann die Angabe von Testzahlen für die CO<sub>2</sub>- und CC-Methoden unklar sein, da sie keinen Bezug zur Konzentration der Nährstoffe im Boden herstellen und somit auch nicht vergleichbar mit den Ergebnissen der H<sub>2</sub>O<sub>10</sub>- und AAE10-Methoden sind.

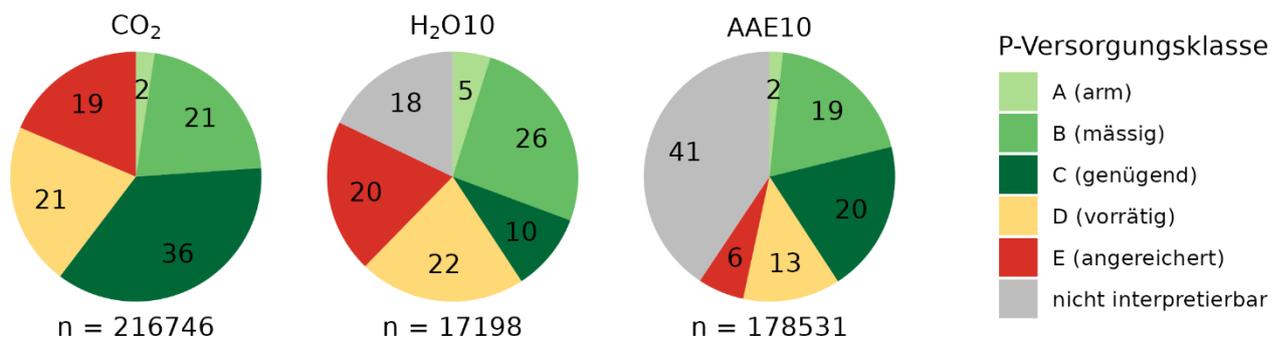


Abbildung 2: Prozentuale Verteilung der Resultate der Phosphorbestimmungen mit den Extraktionsmethoden CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O<sub>10</sub> und AAE10 im ÖLN in den Jahren 2010 bis 2019 auf die Versorgungsklassen A (arm), B (mässig), C (genügend), D (vorrätig) und E (angereichert) unter Berücksichtigung des pH-Wertes, der Körnung und des organischen Kohlenstoffgehalts gemäss Tabellen 10, 13 und 16 in Flisch et al., 2017. Grau eingefärbte Anteile repräsentieren Resultate, die derzeit nicht nach den GRUD interpretiert werden können. n = Anzahl der Messungen.

In den GRUD fehlen nicht nur Interpretationstabellen für Nährstoffgehalte im Unterboden, sondern auch Informationen zur Einschätzung der Calciumgehalte im AAE10-Extrakt. Gemäss Flisch et al., 2017, sei die Calciumversorgung der Pflanzen in der Regel durch die meist ausreichende Calciumverfügbarkeit in Schweizer Böden sichergestellt. Auf Standorten mit niedrigem Boden-pH-Wert können jedoch an calciumbedürftigen Kulturen wie Kartoffeln oder Zuckerrüben calciummangelbedingte Störungen wie Braunfäule oder Hohlherzigkeit auftreten (Marschner, 2011). Ein Überangebot an Calcium kann hingegen die Magnesium- oder Kalium-Aufnahme in die Pflanzenwurzeln beeinträchtigen (Kationenantagonismus) und somit zu einem Mangel dieser Nährstoffe führen. Die Kationenaustauschkapazität gibt standardmässig Auskunft über die Kationenverhältnisse im Boden und liefert damit weitere wertvolle Informationen für die Düngeempfehlung. Diese Analyse muss allerdings zusätzlich durchgeführt und bezahlt werden.

## 4 Lösungsansätze

### 4.1 Probenahme

Die Vereinheitlichung der Angaben in den wichtigsten relevanten Informationsquellen kann viele bestehende Unklarheiten beseitigen. Als Grundlage dienen die Referenzmethoden, die im Bereich Probenahme allerdings Aktualisierungsbedarf haben. Insbesondere müssen der Durchmesser des Probenstechers, die Anzahl und Verteilung der Einstiche pro Beprobungseinheit und die Teilung der Mischprobe vor dem Einsenden ins Labor widerspruchsfrei geklärt werden. Falls die Teilung der Mischprobe aus Kapazitätsgründen notwendig ist, sind mehr Details zu deren Durchführung nötig. Falls die Teilung vermieden werden soll, muss ein Maximaldurchmesser des Probenstechers definiert werden, um die Probenmenge von ca. 1 kg bei 20 Einstichen pro Beprobungseinheit nicht zu überschreiten. Der Wintex-Probenstecher (bodenproben.ch) mit ca. 1.8 cm Durchmesser erfüllt diese Voraussetzung knapp. Alternativ müsste die empfohlene Anzahl der Einstiche reduziert werden, was allerdings die räumliche Repräsentativität der Mischproben beeinträchtigen würde. Ebenso müssen Anforderungen an die Homogenität einer Beprobungseinheit, deren Mindest- und Maximalgrösse, sowie obligatorische Zusatzinformationen wie Probenahmedatum, Kultur, Probenahmetiefe, Betrieb und Fläche und allenfalls Koordinaten in den Referenzmethoden klar definiert werden. Im «Handbuch Probenahme und Probenvorbereitung für Schadstoffuntersuchungen in Böden» sind umfangreiche Informationen zu den Grundlagen der Bodenprobenahme wie Probenahmemuster, Gewinnung von Mischproben oder Probenahmetiefe enthalten (Hämmann and Desaulles, 2003). Diese Empfehlungen basieren auf zahlreichen kantonalen Bodenuntersuchungen und Forschungsprojekten in den 1980iger und 1990iger Jahren und könnten für die Nährstoffuntersuchungen übernommen und allenfalls angepasst werden. Falls sich die Anforderungen zwischen Düngeberatung und ÖLN unterscheiden, muss dies in der DZV und den darauf basierenden Richtlinien konsistent geregelt sein.

Die Probenahmetiefen sind zwar bereits in den Referenzmethoden eindeutig definiert, jedoch muss eine gesamtschweizerische Vorgehensweise insbesondere im Umgang mit den oberen 2 cm des Oberbodens gefunden werden. Ein wichtiger Anhaltspunkt ist die Gültigkeit der Interpretationstabellen in den GRUD (ab 0 cm, ausser im Reb- und mehrjährigen Beerenbau), jedoch muss auch der Umgang mit aufliegenden organischen Düngemittelresten, Ernterückständen und Wurzelfilz geklärt werden. Dies sollte mit verschiedenen Interessengruppen aus Forschung, Praxis und Vollzug thematisiert werden. Ein einheitliches Probenahmeprotokoll inkl. (visualisierter) Kurzanleitung als anwenderfreundlicher Zusatz zu den Referenzmethoden kann für die Standardisierung der Probenahme hilfreich sein.

### 4.2 Analytische Bestimmung

Für die Vereinheitlichung der schwachen Extraktionsmethoden CO<sub>2</sub>, CC und H<sub>2</sub>O<sub>10</sub> ist zu prüfen, ob eine Methode mittelfristig für alle Kulturgruppen eingesetzt werden kann. Dafür können Literaturstudien und Korrelationsanalysen bestehender Daten aus Langzeit-Feldversuchen unter Berücksichtigung von Begleitvariablen (Körnung, pH-Wert, organischer Kohlenstoff- und Calciumgehalt des Bodens) für die verschiedenen Nährstoffe durchgeführt werden. Umfragen unter den Umweltlaboren können Informationen zu den Vor- und Nachteilen der Methoden in der praktischen Anwendung, wie zum Beispiel die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse, Fehleranfälligkeit, analytische Einschränkungen und Kosten liefern.

Zusätzlich zur aktuell geltenden Bestimmung von Phosphor in den Extrakten mittels Photometrie hat sich in den letzten Jahren die Emissionsspektroskopie für verschiedene Anwendungen etabliert (Ivanov et al., 2012; Adesanwo et al., 2013). Die Erweiterung der Referenzmethoden in diesem Bereich hätte Vorteile für Routineanalysen in der Düngeberatung und im Umweltmonitoring, da mehrere Elemente im Extrakt gleichzeitig gemessen werden können und der organisch gebundene Phosphor ebenfalls erfasst wird. Um die Ergebnisse beider Analysemethoden vergleichen und für die Interpretation des Versorgungszustands des Bodens nutzen zu können, sind numerische Umrechnungsfunktionen notwendig, welche zusätzliche Bodeneigenschaften wie pH-Wert, organischer Kohlenstoffgehalt und Körnung berücksichtigen (Adesanwo et al., 2013). Diese können für die jeweiligen Extraktionsmethoden mit multivariaten Regressionsanalysen aus vorhandenen Langzeit-Feldversuchsdaten abgeleitet werden.

Die obligatorische analytische Bestimmung der Körnung und des organischen Kohlenstoffgehalts, das heisst die Ablösung der Fühl- / Sichtprobe als Äquivalenzmethode, würde Fehleinschätzungen bei Düngeempfehlungen und im Umweltmonitoring erheblich reduzieren. Allerdings sind derzeit zugelassene Alternativen (Sedimentationsmethode für Körnung und Dichromatmethode bzw. Temperaturgradientenmethode für organischen Kohlenstoffgehalt) aus Ressourcen- und Kapazitätsgründen für die Routineanalytik im ÖLN nicht praxistauglich. Die Entwicklung und Validierung neuer Methoden hat daher grosse Priorität. Im Bereich der Bodenspektroskopie werden zunehmend Messungen im nahen und mittleren Infrarot-Bereich (NIRS-MIRS) genutzt, um an trockenen verarbeiteten Bodenproben gleichzeitig mehrere Bodeneigenschaften, unter anderem pH-Wert, Tongehalt, totaler und organischer Kohlenstoffgehalt, verschiedene Kohlenstoff-Fractionen, sowie verfügbares Calcium und Magnesium mit hoher Genauigkeit abzuschätzen (Viscarra Rossel et al., 2006; Zimmermann et al., 2007; Nocita et al., 2015; Baumann et al., 2021; Ramírez et al., 2021). Am Kompetenzzentrum Boden wird derzeit eine Spektralbibliothek für NIRS-MIRS aufgebaut, mit dem vorrangigen Ziel, die Basisbodeneigenschaften pH-Wert, Körnung, organischer Kohlenstoffgehalt und Kationenaustauschkapazität in kantonalen Bodenkartierungen effizienter bestimmen zu können. Je mehr unterschiedliche Böden aus der ganzen Schweiz in der Spektralbibliothek abgebildet sind, desto genauer und kostengünstiger können zukünftig die Bodeneigenschaften von neu erhobenen Bodenproben mit NIRS-MIRS bestimmt werden. Die Spektralbibliothek kann um weitere Bodeneigenschaften wie totaler Phosphor- oder Kaliumgehalt erweitert werden, wenn diese Parameter an einer Vielzahl von Bodenproben auch analytisch bestimmt werden.

Bodenparameter, welche sich über längere Zeit wenig oder gar nicht verändern, sollten georeferenziert erhoben und in einem Betriebsdatenbanksystem hinterlegt werden, so dass sie für verschiedene Betriebsleitungs-, Beratungs- und Vollzugsaufgaben abgerufen werden können und nicht wiederholt bestimmt werden müssen. Ein solches Betriebsdatenbanksystem könnte weiterhin mit Informationen zu Erosionsrisiko, Phosphorausstragsrisiko, Biodiversität, etc. verknüpft werden.

### 4.3 Interpretation nach GRUD

Aus agronomischer Sicht wäre die vollständige Überarbeitung der Interpretationstabellen für die Nährstoffgehalte in Böden sinnvoll. Zum einen sollten die Tabellen für Phosphor im H<sub>2</sub>O<sub>10</sub>-Extrakt und Phosphor und Magnesium im AAE<sub>10</sub>-Extrakt für alle pH-Bereiche erweitert werden, um das Potential der Methoden vollständig auszuschöpfen. Aufgrund der Empfindlichkeit der AAE<sub>10</sub>-Methode gegenüber Karbonaten in der Bodenprobe ist die Einschätzung der Ertragsreaktion auf den Phosphorgehalt und damit die Ableitung der Düngeempfehlung für alkalische Böden bisher nicht möglich gewesen. Neue Untersuchungen an sechs Langzeit-Feldversuchen mit differenzierter Phosphordüngung über 30 Jahre zeigen allerdings, dass lediglich die Lage der Ertragsreaktionskurve, nicht jedoch ihre Form durch den pH-Wert substantiell beeinflusst wird (Abbildung 3b), so dass Phosphorgehalte für optimale Erträge mit einer entsprechenden Korrektur ableitbar wären (Hirte et al., 2021).

Zum anderen sollten weitere wichtige Bodeneigenschaften für die Einschätzung des Versorgungszustands des Bodens und die Nährstoffaneignung der Pflanzen berücksichtigt werden. Aufgrund der besonderen Bedeutung des organischen Bodenkohlenstoffs für die Struktur und damit für die Durchwurzelbarkeit von Böden können kohlenstoffreiche Böden den Nährstoffbedarf der Pflanzen auch bei geringen Nährstoffgehalten oft noch adäquat decken (Johnston et al., 2014). Daher ist der organische Kohlenstoffgehalt für die Ableitung der Düngeempfehlung ähnlich wichtig wie der Tongehalt eines Bodens.

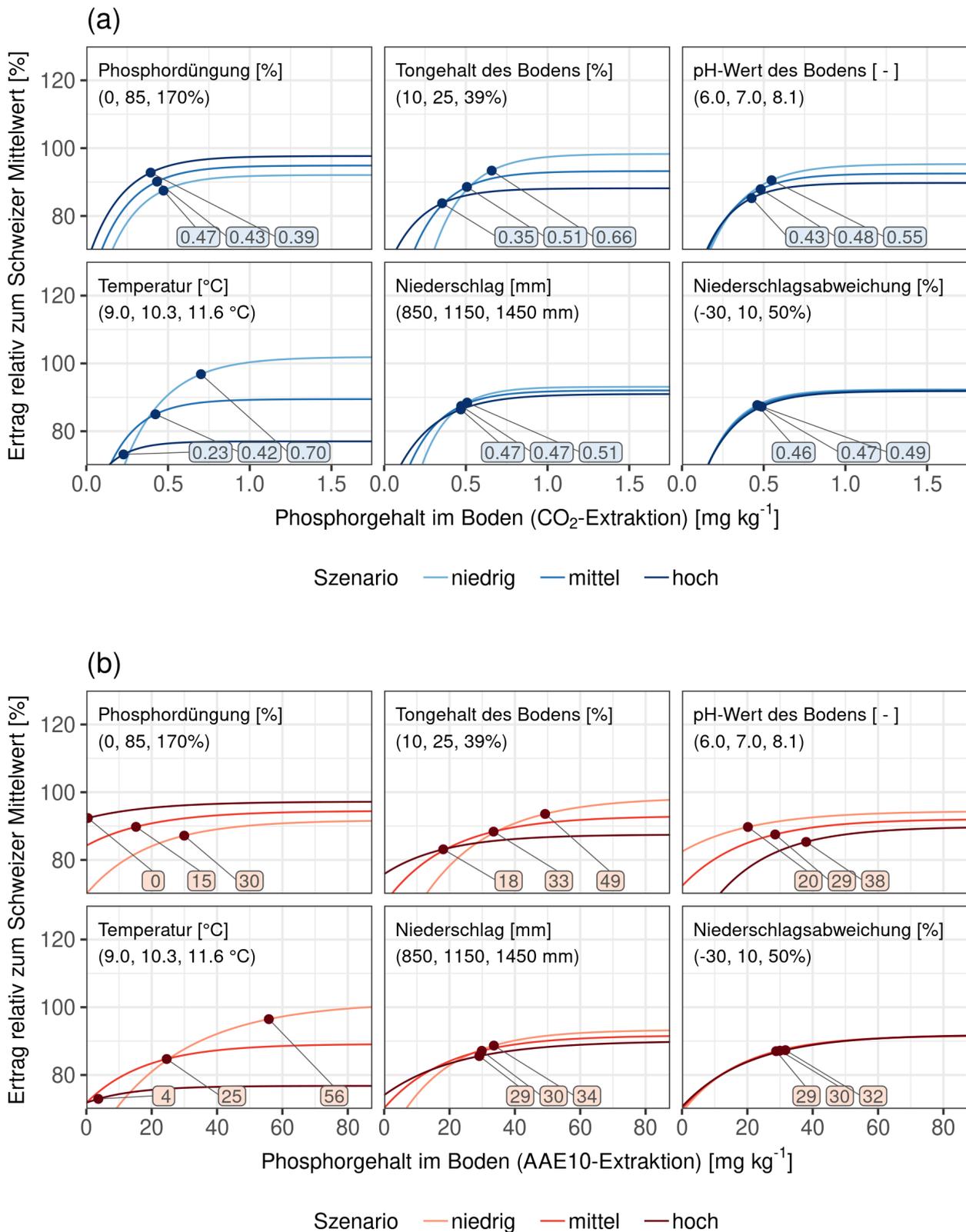


Abbildung 3: Ertragsreaktionen von Kartoffeln auf Phosphorgehalte im Boden gemessen mit der (a) CO<sub>2</sub>- und (b) AAE10-Methode in sechs Schweizer Langzeit-Feldversuchen mit differenzierter Phosphordüngung über 30 Jahre. Die Phosphordüngung ist auf allen Standorten identisch und wird zwischen 0 und 170% des theoretischen Pflanzenentzugs basierend auf den GRUD variiert. Die Standorte sind durch Unterschiede in Tongehalt und pH-Wert des Bodens, Jahresdurchschnittstemperatur, Jahresniederschlagssumme und Abweichung des Niederschlags von der Norm während der Hauptwachstumsperiode gekennzeichnet. Kritische Phosphorgehalte im Boden (Zahlen in Boxen) wurden für hinreichende Erträge, d.h. 95% des Maximalertrags, in unterschiedlichen Szenarien gerechnet (Zahlen in Klammern). (Hirte et al., 2021)

Weiterhin kann die Berücksichtigung von klimatischen Standortbedingungen wesentlich zur Verbesserung der Interpretation der Nährstoffgehalte im Boden beitragen. Zum Beispiel resultieren niedrige Jahresdurchschnittstemperaturen in höheren Phosphorgehalten für optimale Erträge (Hirte et al., 2021). Somit könnten Düngempfehlungen für unterschiedliche Klimaregionen entwickelt werden, ähnlich wie die gezielte Sortenwahl auf Basis von Temperatursummen (Buzzi et al., 2021).

Ertragsreaktionen und Düngempfehlungen sollten für alle Extraktionsmethoden separat validiert werden. Somit könnten auch die Abstufungsgenauigkeit zwischen den Gehaltsklassen individuell angepasst und die numerische Genauigkeit der Kennwerte auf die Analysengenauigkeit abgestimmt werden. Aufgrund der besonderen Bedeutung der Nährstoffreserven im Unterboden für die Pflanzenernährung wäre mittelfristig auch die Berücksichtigung von Unterbodenanalysen für alle Kulturgruppen in den GRUD wünschenswert. Ebenso sollten Informationen zur Einordnung der Calciumgehalte im AAE10-Extrakt zur Verfügung gestellt werden.

Für die vollständige Überarbeitung der Interpretationstabellen ist eine grosse Datengrundlage, welche die pedoklimatische Variabilität der landwirtschaftlich genutzten Fläche in der Schweiz abdeckt, nötig. Dafür könnten die ÖLN-Bodenuntersuchungsdaten genutzt werden, wenn analytisch bestimmte Bodenparameter und Angaben zu Kultur und Ertrag, Folgekultur und Ertragserwartung, Bewirtschaftung (Düngung, Bodenbearbeitung, Sorte) und Lage der Fläche (für klimatische Informationen) zur Verfügung stehen würden. Ein professionelles standardisiertes Datenmanagementsystem und eine Datenbanklösung mit automatisierten Verknüpfungen zu Metadaten (zum Beispiel Klimavariablen, inhärente Bodeneigenschaften) würde darüber hinaus die Möglichkeit bieten, die Daten im Rahmen der Datenschutz-Gesetzgebung für weitere Beratungs-, Monitoring- und Vollzugsinstrumente zu nutzen.

Langfristig sollten die kategorischen Interpretationstabellen von numerischen Modellen abgelöst werden, um mehrere wichtige Einflussfaktoren auf die Nährstoffverfügbarkeit und deren Interaktionen simultan berücksichtigen zu können und den Klassensprung-Effekt bei der Abschätzung des Düngedarfes zu vermeiden (grosse Unterschiede beim abgeschätzten Düngedarf aufgrund klassierter Korrekturfaktoren, zum Beispiel bei einem Wechsel zwischen Tongehaltsklassen). Dafür ist ein digitales Düngempfehlungstool wie das in Deutschland genutzte BESyD (LfULG Sachsen, 2021) oder der Australische BFDC Interrogator (NSW DPI, 2021) notwendig. Solche Systeme können für Bewirtschaftungsempfehlungen in anderen Bereichen, zum Beispiel Stickstoffdüngung, humusfördernde Massnahmen, Kalkung, Bodenbearbeitung oder Sortenwahl, modular weiterentwickelt werden.

## 5 Schlussfolgerungen

Bei der Charakterisierung des Nährstoffzustands von Böden besteht aktuell ein grosses Entwicklungspotenzial, insbesondere bei der Probenahme, den Bestimmungsmethoden und der Interpretation (Abbildung 4). Hier gibt es konkrete Verbesserungsmöglichkeiten, die zeitnah implementiert werden können, aber auch mittel- und langfristige Ansätze, die für die breite Anwendung in Praxis und Vollzug noch optimiert werden müssen, wie zum Beispiel die NIRS-MIRS-Methode. Sowohl die Bewirtschaftungsplanung als auch der agrarpolitische Vollzug (ÖLN), das Agrarumweltmonitoring und die Standortcharakterisierung und Bodenkartierung würden massgeblich davon profitieren.

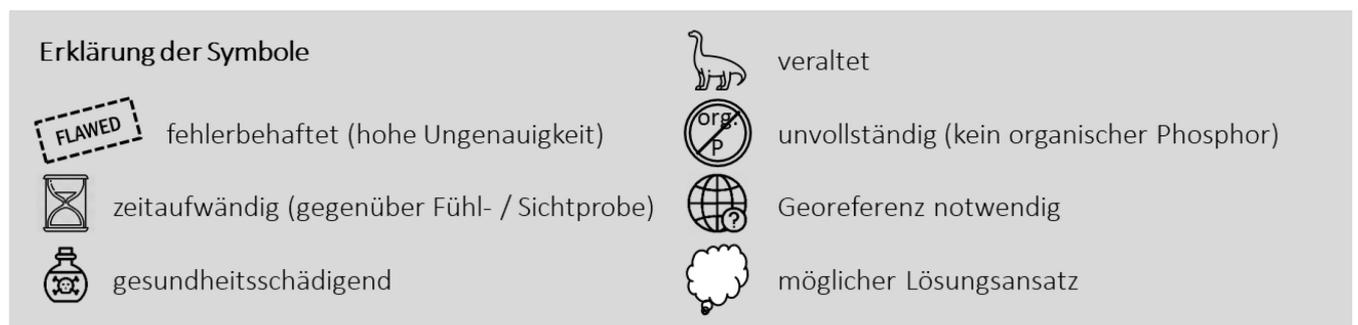
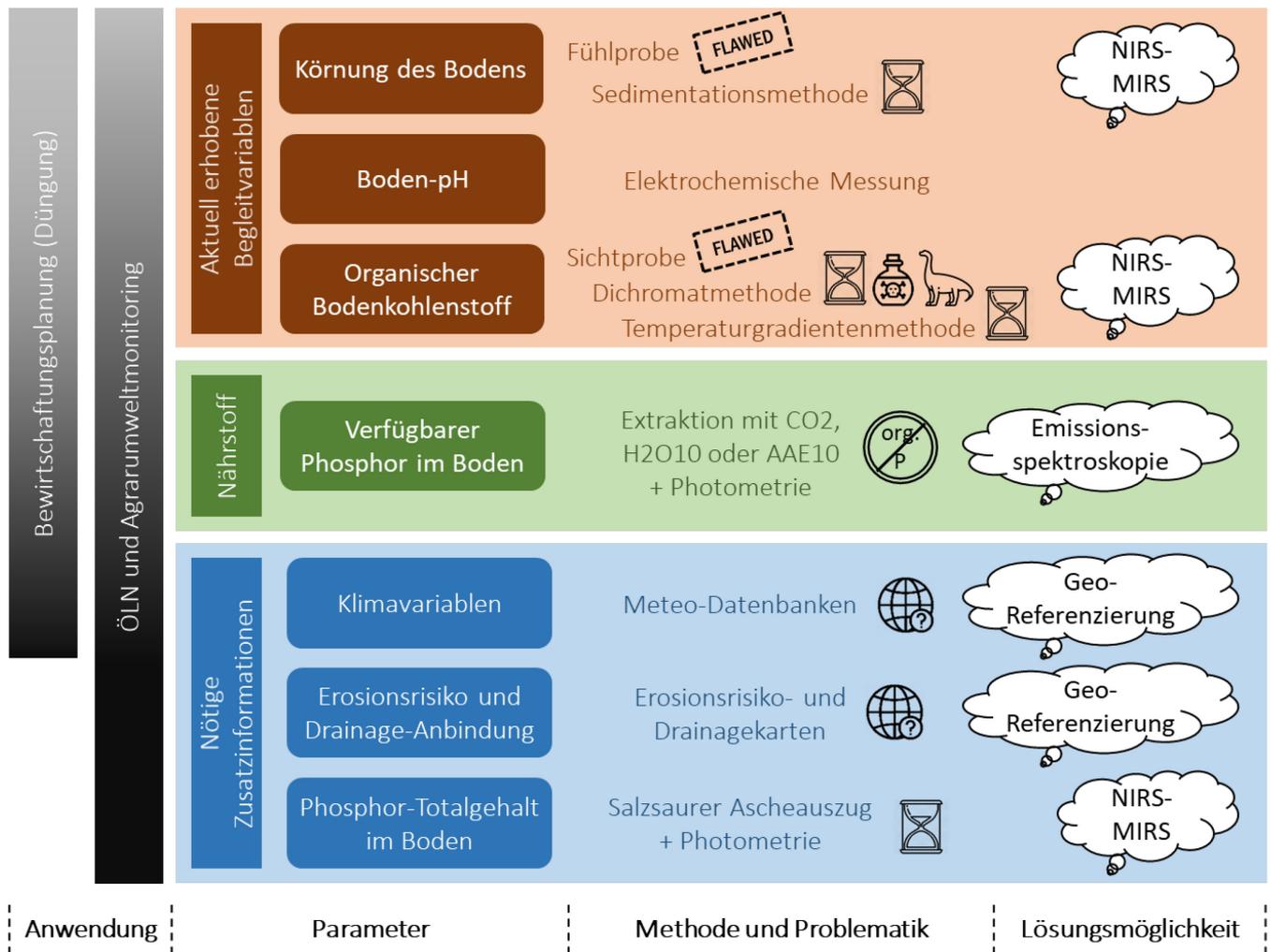


Abbildung 4: Konzept für die Weiterentwicklung der Bestimmung von Phosphor im Boden für die Bewirtschaftungsplanung, den ÖLN und das Agrarumweltmonitoring.

## 6 Literatur

- Adesanwo, O.O., Ige, D.V., Thibault, L., Flaten, D., Akinremi, W., 2013. Comparison of Colorimetric and ICP Methods of Phosphorus Determination in Soil Extracts. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 44, 3061-3075.
- Banerjee, S., Walder, F., Büchi, L., Meyer, M., Held, A.Y., Gattinger, A., Keller, T., Charles, R., Van Der Heijden, M.G., 2019. Agricultural intensification reduces microbial network complexity and the abundance of keystone taxa in roots. *The ISME journal* 13, 1722-1736.
- Baumann, P., Helfenstein, A., Gubler, A., Keller, A., Meuli, R., Wächter, D., Lee, J., Viscarra Rossel, R., Six, J., 2021. Developing the Swiss soil spectral library for local estimation and monitoring. *SOIL Discussions*.
- Bircher, P., Liniger, H., Prasuhn, V., 2019. Aktualisierung und Optimierung der Erosionsrisikokarte (ERK2): Die neue ERK2 (2019) für das Ackerland der Schweiz: Schlussbericht.
- BLW, 2020. Verordnung über die Direktzahlungen an die Landwirtschaft (Direktzahlungsverordnung, DZV) vom 23. Oktober 2013. 910.13. In: BLW, B.f.L. (Ed.), Bern.
- Buzzi, F., Hiltbrunner, J., Holzkämper, A., Calanca, P., 2021. Temperatursummen-Karten für die Sortenwahl im Maisanbau. *Agrarforschung Schweiz* 12, 1-8.
- Demaria, P., Flisch, R., Frossard, E., Sinaj, S., 2005. Exchangeability of phosphate extracted by four chemical methods. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 168, 89-93.
- Flisch, R., Neuweiler, R., Kuster, T., Oberholzer, H., Huguenin-Elie, O., Richner, W., 2017. 2/ Bodeneigenschaften und Bodenanalysen. *Grundlagen der Düngung landwirtschaftlicher Kulturen in der Schweiz (GRUD 2017)*(Hrsg. W. Richner & S. Sinaj). *Agrarforschung Schweiz* 8, 1-2.
- Hämmann, M., Desaulles, A., 2003. *Handbuch: Probenahme und Probenvorbereitung für Schadstoffuntersuchungen in Böden*. Federal Office for the Environment (BUWAL).
- Hirte, J., Richner, W., Orth, B., Liebisch, F., Flisch, R., 2021. Yield response to soil test phosphorus in Switzerland: Pedoclimatic drivers of critical concentrations for optimal crop yields using multilevel modelling. *Science of The Total Environment* 755, 143453.
- Ivanov, K., Zapryanova, P., Petkova, M., Stefanova, V., Kmetov, V., Georgieva, D., Angelova, V., 2012. Comparison of inductively coupled plasma mass spectrometry and colorimetric determination of total and extractable phosphorus in soils. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy* 71-72, 117-122.
- Johnston, A.E., Poulton, P.R., Fixen, P.E., Curtin, D., 2014. Chapter Five - Phosphorus: Its Efficient Use in Agriculture. In: Sparks, D.L. (Ed.), *Advances in Agronomy*. Academic Press, pp. 177-228.
- Kautz, T., Amelung, W., Ewert, F., Gaiser, T., Horn, R., Jahn, R., Javaux, M., Kemna, A., Kuzyakov, Y., Munch, J.-C., Pätzold, S., Peth, S., Scherer, H.W., Schloter, M., Schneider, H., Vanderborght, J., Vetterlein, D., Walter, A., Wiesenberg, G.L.B., Köpke, U., 2013. Nutrient acquisition from arable subsoils in temperate climates: A review. *Soil Biology and Biochemistry* 57, 1003-1022.
- KIP, 2021. KIP-Richtlinien für den ökologischen Leistungsnachweis (ÖLN). In: (KIP), K.R.T.u.D. (Ed.). Agridea, Eschikon.
- Koch, U., Prasuhn, V., 2020. Drainagekarte Schweiz. Erstellung einer Karte potentiell drainierter Flächen in der Schweiz mittels «Machine Learning». *Agroscope Science*. Agroscope, Zürich, p. 121.
- LfULG Sachsen, 2021. Bilanzierungs- und Empfehlungssystem Düngung BESyD. Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie. Web page: [www.landwirtschaft.sachsen.de/duengebedarfsermittlung-besyd-20619.html](http://www.landwirtschaft.sachsen.de/duengebedarfsermittlung-besyd-20619.html).
- Marschner, H., 2011. *Marschner's mineral nutrition of higher plants*. Academic press.

- Nocita, M., Stevens, A., van Wesemael, B., Aitkenhead, M., Bachmann, M., Barthès, B., Ben Dor, E., Brown, D.J., Clairotte, M., Csorba, A., Dardenne, P., Demattê, J.A.M., Genot, V., Guerrero, C., Knadel, M., Montanarella, L., Noon, C., Ramirez-Lopez, L., Robertson, J., Sakai, H., Soriano-Disla, J.M., Shepherd, K.D., Stenberg, B., Towett, E.K., Vargas, R., Wetterlind, J., 2015. Chapter Four - Soil Spectroscopy: An Alternative to Wet Chemistry for Soil Monitoring. In: Sparks, D.L. (Ed.), *Advances in Agronomy*. Academic Press, pp. 139-159.
- NSW DPI, 2021. Making Better Fertiliser Decisions for Cropping Systems in Australia (BFDC). New South Wales Department of Primary Industries. Web page: [www.bfdc.com.au](http://www.bfdc.com.au).
- PIOCH, 2021. PER - Romandie 2021 Prestations écologiques requises : règles techniques. Groupe romand de coordination PER grandes cultures, fourragères, maraîchères et PIOCH.
- Ramírez, P.B., Calderón, F.J., Haddix, M., Lugato, E., Cotrufo, M.F., 2021. Using Diffuse Reflectance Spectroscopy as a High Throughput Method for Quantifying Soil C and N and Their Distribution in Particulate and Mineral-Associated Organic Matter Fractions. *Frontiers in Environmental Science* 9.
- Richardson, A.E., George, T.S., Hens, M., Simpson, R.J., 2005. Utilization of soil organic phosphorus by higher plants. *Organic phosphorus in the environment*, 165-184.
- Steinfurth, K., Hirte, J., Morel, C., Buczko, U., 2021. Conversion equations between Olsen-P and other methods used to assess plant available soil phosphorus in Europe—A review. *Geoderma* 401, 115339.
- Stünzi, H., 2006. Die P-Bodenextraktionsmethoden mit Wasser und CO<sub>2</sub>-Wasser. *Agrarforschung Schweiz* 13, 284-289.
- Stünzi, H., 2007. Bodenuntersuchungsmethoden für K, Ca und Mg im Vergleich. *Agrarforschung Schweiz* 14, 358-363.
- Viscarra Rossel, R.A., Walvoort, D.J.J., McBratney, A.B., Janik, L.J., Skjemstad, J.O., 2006. Visible, near infrared, mid infrared or combined diffuse reflectance spectroscopy for simultaneous assessment of various soil properties. *Geoderma* 131, 59-75.
- Zimmermann, M., Leifeld, J., Fuhrer, J., 2007. Quantifying soil organic carbon fractions by infrared-spectroscopy. *Soil Biology and Biochemistry* 39, 224-231.