Agroscope gutes Essen, gesunde Umwelt

2/ Bodeneigenschaften und Bodenanalysen

René Flisch[1], Reto Neuweiler[2], Thomas Kuster[2], Hansrudolf Oberholzer[1], Olivier Huguenin-Elie[1] und Walter Richner[1]

[1] Agroscope, 8046 Zürich, Schweiz

[2] Agroscope, 8820 Wädenswil, Schweiz

Auskünfte: rene.flisch@agroscope.admin.ch

Inhalt

1. Einleitung 2/3
2. Standorteigenschaften 2/3
   - 2.1 Körnung und Bodenart 2/3
   - 2.2 Humusgehalt 2/4
   - 2.3 pH-Wert (Bodenreaktion) 2/5
   - 2.4 Kalkgehalt 2/5
3. Bodenanalysen und Interpretation der Resultate 2/6
   - 3.1 Empfehlungen für die Bodenuntersuchung 2/6
   - 3.2 Methoden zur Bodenuntersuchung 2/7
   - 3.3 Wahl der Bodenanalysemethode für die Grunduntersuchung 2/7
   - 3.4 Interpretation von P-, K- und Mg-Bodenanalysen zur Ermittlung des Düngebedarfs 2/9
4. Die Nährstoffversorgung des Bodens 2/11
   - 4.1 Korrektur der P- und K-Düngung aufgrund der CO_2-Methode 2/11
   - 4.2 Korrektur der Mg-Düngung aufgrund der $CaCl_2$-Methode 2/13
   - 4.3 Korrektur der P-, K- und Mg-Düngung aufgrund der H_2O10-Methode 2/13
   - 4.4 Korrektur der P-, K- und Mg-Düngung aufgrund der AAE10-Methode 2/16
   - 4.5 Die Ermittlung des Düngebedarfs an P, K und Mg 2/20
   - 4.6 Spezielle Hinweise zum Einsatz von P-, K- und Mg-Düngern 2/20
   - 4.7 Weitere Nährstoffe und Spurenelemente 2/21
5. Kalkung 2/24
   - 5.1 Bemessung der Kalkgaben aufgrund des pH-Wertes 2/25
   - 5.2 Bemessung der Kalkgaben aufgrund der Kationenaustauschkapazität und der Basensättigung 2/26
   - 5.3 Spezielle Hinweise zur Kalkung 2/26
6. Bodenfruchtbarkeit und Humusbewirtschaftung 2/28
   - 6.1 Der Begriff Bodenfruchtbarkeit 2/28
   - 6.2 Bodenfunktionen und Bodeneigenschaften 2/28
   - 6.3 Langfristige Erhaltung des Humusgehaltes – Entscheidungshilfen und geeignete Massnahmen 2/29
7. Literatur 2/31
8. Tabellenverzeichnis 2/32
9. Abbildungsverzeichnis 2/33

Vorderseite: Profil eines landwirtschaftlich genutzten Bodens (Foto: Gabriela Brändle, Agroscope).

1. Einleitung

Der Boden spielt als landwirtschaftlicher Produktionsfaktor zur Erzeugung hochwertiger Nahrungs- und Futtermittel eine grundlegende Rolle, denn Wasser und Nährstoffe werden von den Pflanzen vorwiegend aus dem Boden aufgenommen. Für das Pflanzenwachstum sind ein guter Bodenzustand und eine ausreichende sowie ausgewogene Menge an verfügbaren Nährstoffen wie Stickstoff (N), Phosphor (P), Kalium (K), Magnesium (Mg), Schwefel (S) und verschiedenen Spurenelementen nötig.

Durch die Düngung können optimale Bedingungen für das Wachstum und die Ertragsbildung der Kulturpflanzen geschaffen werden. Gleichzeitig ist aber auch darauf zu achten, dass möglichst geringe Nährstoffverluste entstehen, welche die Umwelt belasten. Um eine pflanzen- und umweltgerechte sowie effiziente Nutzung der Nährstoffe zu erreichen, sind nicht nur der Bedarf der Pflanzen, sondern auch die vorhandenen Nährstoffgehalte im Boden zwingend zu berücksichtigen (siehe Düngungskonzept in Modul 1/ Einleitung, Abbildung 2).

Mit Hilfe der Bodenuntersuchung können sowohl bodenphysikalische und -chemische Eigenschaften als auch die Nährstoffversorgung eingeschätzt und beurteilt werden. Zur Ermittlung des Düngebedarfs sind geeignete Methoden zu wählen, welche Rückschlüsse auf die Pflanzenverfügbarkeit des betreffenden Nährstoffs und damit die Nährstoffversorgung des Bodens zulassen. Eine fundierte Bewertung der Analysenresultate hinsichtlich der gewünschten Zielgrösse (z. B. Ertrag, Qualität) muss zwingend möglich sein. Solche Zusammenhänge als Grundlage für eine Interpretation der Analysenergebnisse lassen sich meist nur in langjährigen Feldversuchen ermitteln. Analysenmethode und Interpretation der Resultate sind somit eine nicht trennbare Einheit. Denn verschiedene Analysenmethoden liefern aufgrund ihrer Eigenschaften unterschiedliche Resultate, die nicht austauschbar sind und in der Regel in einer ungenügend korrelierten Beziehung zueinander stehen.

2. Standorteigenschaften

Die Entwicklung der angebauten Kulturen wird nicht nur durch chemische Eigenschaften des Bodens beeinflusst. Physikalische und andere Bodeneigenschaften wie die durchwurzelbare Bodentiefe (Gründigkeit), der Steinanteil (Skelettgehalt) oder die Bodenstruktur und Strukturstabilität spielen eine entscheidende Rolle. Letztere bestimmen den Wasser- und Lufthaushalt im Boden und haben daher einen massgeblichen indirekten Einfluss auf die Wurzelentwicklung. So ist das Wurzelwachstum in strukturschwachen und verdichteten Böden infolge Sauerstoffmangels gehemmt, und zeitweilige Bodenvernässung erhöht den Befallsdruck von Wurzelkrankheiten. Das Nährstoffaneignungsvermögen des dadurch geschwächten Wurzelwerkes ist stark vermindert, was sich auch durch eine erhöhte Nährstoffzufuhr über die Düngung nicht kompensieren lässt.

Insbesondere in Flächen, die neu mit mehrjährigen Kulturen bebaut werden, lohnt sich eine vorgängige Beurteilung des Bodenprofils (Abbildung 1). Dieses lässt wichtige Rückschlüsse auf die Anbaueignung eines Bodens zu und dient als Entscheidungsgrundlage hinsichtlich der Ergreifung von allfälligen Sanierungs- und Kulturmassnahmen wie der Notwendigkeit einer Drainage, der Bearbeitungstiefe und der Wahl der Unterlage in Obst- und Rebkulturen. Physikalische und chemische Untersuchungen der einzelnen Bodenhorizonte können zudem Aufschluss über die Strukturstabilität, die Dynamik der Nährstoffe im Unterboden und deren horizontale und vertikale Verlagerung geben.

Sämtliche im Boden ablaufenden biologischen Prozesse werden unter dem Begriff «biologische Bodenaktivität» zusammengefasst. Diese ist ein wichtiger Indikator für die Bodenfruchtbarkeit (siehe Kapitel 6).

Abbildung 1 | Beurteilung des Bodenprofils (Foto: Andreas Naef, Agroscope).

2.1 Körnung und Bodenart

Die Körnung der Feinerde (≤ 2 mm Durchmesser), auch als Bodentextur bezeichnet, wird durch die Anteile der unterschiedlich grossen mineralischen Bodenteilchen (Ton, Schluff und Sand) bestimmt. Von der Körnungszusammensetzung wird zusammen mit dem Humusgehalt (siehe Kapitel 2.2) die Bodenart abgeleitet (z. B. humoser sandiger Lehm). Die Bodenart beeinflusst:

- das potenzielle Nährstoffangebot
- die Dynamik der Nährstoffe im Boden
- die Verdichtungsanfälligkeit
- die Strukturstabilität (und damit die Erosions- und Verschlämmungsanfälligkeit)
- die Wasserführung
- die Bodenbearbeitbarkeit

Die Körnung ist wichtig für das Verständnis vieler Bodenfunktionen und wird daher bei der Interpretation von

Tabelle 1 | Beziehung zwischen Tonklassen (Tonanteilen) und Bodeneigenschaften.

	Schwellenwerte für die Interpretation der Nährstoffanalysen				
	Sandböden	sandig-lehmige Böden	Lehmböden	lehmig-tonige Böden	Tonböden
Eigenschaften	< 10 % Ton	10–19,9 % Ton	20–29,9 % Ton	30–39,9 % Ton	≥ 40 % Ton
Wasserdurchlässigkeit	sehr gut	gut	gut	mittel	schlecht
Wasserspeicherung	gering	mittel	hoch	hoch	sehr hoch [1]
Durchlüftung	sehr gut	gut	gut	mittel	schlecht
Nährstoffspeicherung	gering	gering–mittel	mittel	gut	sehr gut [1]
Bearbeitbarkeit	leicht	leicht	mittel	mittel–schwer	schwer
Durchwurzelbarkeit	sehr gut	sehr gut	gut	mässig	schlecht

[1] Nur bedingt verfügbar für die Pflanzen.

zahlreichen Untersuchungswerten berücksichtigt. Sie verändert sich praktisch nicht im Laufe der Zeit, daher genügt eine einmalige repräsentative Bestimmung pro Parzelle. Die analytische Messung der Körnung kann durch eine Fühlprobe ersetzt werden, auch wenn deren Genauigkeit nicht derjenigen einer Messung entspricht. Die bei der Bodenuntersuchung verwendeten Tonklassen und Eigenschaften der Bodenarten sind in Tabelle 1 dargestellt.

2.2 Humusgehalt

Die Gesamtheit der Bodenbestandteile, die von pflanzlichen und tierischen Organismen stammen, wird unter dem Begriff «organische Bodensubstanz» zusammengefasst. Diese besteht zum kleineren Teil aus lebenden Organismen (Pflanzenwurzeln, Mikroorganismen und Bodentiere). Den Hauptanteil der organischen Bodensubstanz macht jedoch der Humus aus, der als Gesamtheit der abgestorbenen organischen Bodensubstanz definiert ist. Diese Unterscheidung kann in den Bodenanalysen zur Standortbeurteilung und Düngeberatung nicht gemacht werden. Hier wird die in der Bodenprobe vorhandene organische Substanz dem Humusgehalt gleichgesetzt.

Die Menge und die Beschaffenheit der organischen Substanz haben einen entscheidenden Einfluss auf sehr viele Prozesse im Boden:

- In Umsetzungsprozessen, die unter dem Begriff Mineralisierung zusammengefasst werden, wird Humus abgebaut. Dabei werden neben Kohlendioxid und Wasser Pflanzennährstoffe, insbesondere N und in geringeren Mengen P und S, freigesetzt. Die Mineralisierungsvorgänge werden von verschiedenen Bodenfaktoren beeinflusst. Erhöhte Bodentemperaturen und ein ausgewogener Wasser-/Lufthaushalt fördern den Humusabbau. Im Hinblick auf die längerfristige Erhaltung der Bodenfruchtbarkeit ist ein Gleichgewicht zwischen dem Humusaufbau (Humifizierung) und dem Humusabbau (Mineralisierung) anzustreben (siehe auch Kapitel 6).
- Der Humusgehalt beeinflusst die Bodenstruktur in hohem Masse. Durch die Bildung von Ton-Humus-Komplexen entstehen stabile Bodenkrümel. Diese erhöhen die Porosität und damit verbunden die Wasserdurchlässigkeit und die Durchlüftung des Bodens. Eine stabile Krümelstruktur vermindert zudem das Erosionsrisiko. Selbst bei hoher Niederschlagsintensität ist dann meist eine ausreichende Infiltration des Wassers gewährleistet. Böden mit einem mittleren bis hohen Humusgehalt sind für die Kulturpflanzen leichter durchwurzelbar.

Tabelle 2 | Bodenkundliche Klassifizierung des Humusgehaltes (BGS 2010).

Humusgehalt [1] in Gew.-%	Bezeichnung
< 2 %	humusarm
2–5 %	schwach humos
5–10 %	humos
10–30 %	humusreich
≥ 30 %	Humusboden

[1] Der Humusgehalt des Bodens entspricht dem organisch gebundenen Kohlenstoff (C_{org}), multipliziert mit 1,725.

Tabelle 3 | Agronomische Beurteilung des Humusgehaltes des Bodens zur Abschätzung der potenziellen N-Nachlieferung des Bodens.

Beurteilung des Humusgehaltes[1] (%) des Bodens bei unterschiedlichen Tongehaltsklassen				Potenzielle N-Nachlieferung
< 10 % Ton	10–19,9 % Ton	20–29,9 % Ton	≥ 30 % Ton	
< 1,2	< 1,6	< 2,0	< 2,5	gering
1,2–2,9	1,6–3,4	2,0–3,9	2,5–5,9	ausreichend
3,0–4,9	3,5–6,9	4,0–7,9	6,0–9,9	gut
5,0–19,9	7,0–19,9	8,0–19,9	10,0–19,9	erhöht
≥ 20,0	≥ 20,0	≥ 20,0	≥ 20,0	sehr hoch

[1] Der Humusgehalt des Bodens entspricht dem organisch gebundenen Kohlenstoff (C_{org}), multipliziert mit 1,725.

Der Gehalt des Bodens an Humus wird in fünf Klassen eingeteilt und kann nach chemisch-physikalischen Eigenschaften (bodenkundlich; Tabelle 2) oder nach dessen Auswirkungen auf die N-Dynamik des Bodens (agronomisch; Tabelle 3) beurteilt werden. Aus agronomischer Sicht ist mit zuneh-

mendem Tongehalt des Bodens ein höherer Humusgehalt anzustreben. Der Humusgehalt des Bodens verändert sich bei gleichbleibender Bewirtschaftung längerfristig auch bei relativ hoher Zufuhr von organischem Material nur sehr langsam.

2.3 pH-Wert (Bodenreaktion)

Die Bodenreaktion charakterisiert die Böden nach ihrer Azidität und Alkalinität, ausgedrückt als pH-Wert. Er wird in wässriger Suspension als Gehalt an Wasserstoffionen gemessen und zur Beurteilung in 6 Klassen eingeteilt (Tabelle 4). Der pH-Wert variiert kurzfristig nur wenig; seine Messung wird in regelmässigen Abständen empfohlen, vor allem für saure und neutrale Böden.

Die Bodenreaktion beeinflusst einerseits die biologische Aktivität und anderseits die Pflanzenverfügbarkeit von einzelnen Nährstoffen, insbesondere von P und Mg sowie den meisten Spurenelementen (Abbildung 2). So ist P bei pH-Werten im schwach sauren bis neutralen Bereich am besten pflanzenverfügbar. In alkalischen Böden liegt ein erhöhter Anteil von P in Form von schwer löslichen Calciumphosphaten vor. Mit steigenden pH-Werten sinkt auch die Verfügbarkeit von Eisen (Fe), Mangan (Mn), Zink (Zn) und Bor (B), diejenige von Molybdän (Mo) hingegen steigt. Auf der anderen Seite ist eine Bodenversauerung mit einem deutlichen Anstieg der Löslichkeit von Mn und Aluminium (Al) verbunden. Zu hohe bzw. zu tiefe pH-Werte können folglich bei empfindlichen Kulturen zu Nährstoffmangel oder – vor allem bei einigen Gemüsearten – zu Phytotoxizität führen.

Der pH-Wert kann zur groben Beurteilung des Kalkzustandes und zur Wahl geeigneter Dünger (insbesondere P-Dünger) und Bodenverbesserungsmittel herangezogen werden. Angaben zur Beurteilung des Kalkzustandes des Bodens im Hinblick auf eine Kalkung sind in Kapitel 5 enthalten.

2.4 Kalkgehalt

Der Kalkzustand des Bodens ist ein wichtiger Faktor für die nachhaltige landwirtschaftliche Landnutzung. Er wird entscheidend durch das Muttergestein, aus dem der Boden entstanden ist, durch die Niederschlagsverhältnisse sowie durch die Bewirtschaftungsweise beeinflusst.

Tabelle 4 | Beurteilung des pH-Wertes (Reaktion) und der Kalkbedürftigkeit des Bodens.

$pH_{(H_2O)}$	Bezeichnung	Salzsäureprobe	Beurteilung	Kalkbedürftigkeit[1]
< 5,3	stark sauer	–	kalkfrei	Aufkalkung erforderlich
5,3–5,8	sauer	–	kalkfrei	Aufkalkung erforderlich
5,9–6,7	schwach sauer	–	kalkfrei	Erhaltungskalkung
6,8–7,2	neutral	–	kalkfrei	Erhaltungskalkung
		+	kalkhaltig	Erhaltungskalkung [2]
7,3–7,6	schwach alkalisch	+	kalkhaltig	keine Kalkung
> 7,6	alkalisch	++	stark kalkhaltig	keine Kalkung

[1] Spezielle Anforderungen der Kulturen sind zu berücksichtigen. Im Futterbau sind Pflanzenbestand und an saure Standorte angepasste Pflanzenarten zu berücksichtigen (vgl. Kapitel 5.3.2).
[2] Nur wenn eine Abnahme des pH-Wertes beobachtet wird.

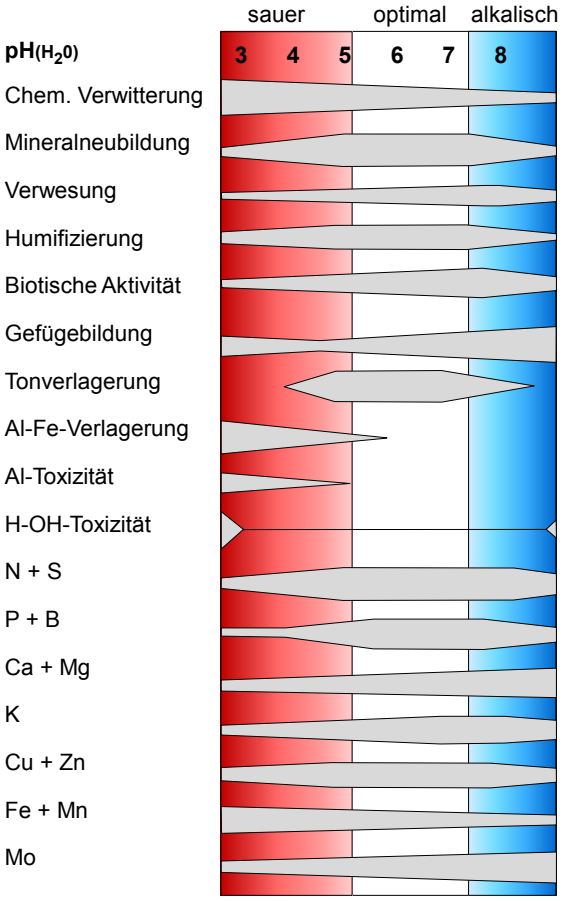

Abbildung 2 | Schema der Beziehung zwischen pH-Wert und pedogenetischen (bodenbürtigen) und ökologischen Faktoren (die Breite der Bänder gibt die Intensität der Vorgänge bzw. die Verfügbarkeit der Nährstoffe an; verändert nach Schroeder 1984).

Der Kalkgehalt ($CaCO_3$) im Boden spielt bei chemischen, physikalischen und biologischen Bodenprozessen eine wichtige Rolle. Die folgenden Prozesse werden durch den Abbau von Kalk in besonderem Masse beeinflusst:

- **Chemische Kalkwirkung**: Der Kalkgehalt beeinflusst den pH-Wert und damit direkt die Verfügbarkeit von Nährstoffen im Boden.
- **Physikalische Kalkwirkung**: Das bei der Zersetzung des Kalkes frei werdende Calcium (Ca^{2+}) beeinflusst die Krümelbildung positiv (Brückenbildung zwischen Ton- und Humusteilchen) und trägt damit zur Erhaltung der Bodenstruktur bei. Auf schweren sowie verschlämmungsgefährdeten Böden erfolgt die Kalkung vorwiegend im Hinblick auf die Verbesserung des Boden-

gefüges und begünstigt damit den Luft- und Wasserhaushalt des Bodens und indirekt das Wurzelwachstum der Pflanzen.

- Die **bodenbiologische Kalkwirkung** ist eine indirekte Wirkung: Ein optimaler pH-Wert sowie ausgeglichene Luft- und Wasserverhältnisse begünstigen die Bodenlebewesen. Dadurch werden Abbau- und Umbauprozesse wie die Zersetzung von Ernteresten, der Aufbau stabiler Humusformen oder die Mineralisation von Nährstoffen gefördert.

Die Versorgung der Pflanzen mit Ca als essenziellem Nährstoff, der durch die Zersetzung des Kalks frei wird, ist von untergeordneter Bedeutung. Auch in sauren Böden ist für die meisten Pflanzen ausreichend Ca in gelöster oder austauschbarer Form vorhanden. Erst bei sehr calciumarmen Böden kann sich im Hinblick auf die Sicherstellung einer ausreichenden Ca-Versorgung der Kulturen eine Aufkalkung oder die Verwendung von kalkhaltigen Düngern als notwendig erweisen.

Kalkverluste treten vor allem durch Auswaschung, den Neutralisationsbedarf im Boden sowie den Entzug von Ca durch die Kulturen auf. Die jährlichen Kalkverluste können einige bis mehrere Hundert Kilogramm $CaCO_3$ pro Hektare betragen. Die Bestimmung des Gesamtkalkgehaltes genügt oft nicht zur Bemessung der Aufkalkung. In diesem Falle wird die Bestimmung der Kationenaustauschkapazität und der Basensättigung empfohlen (siehe Kapitel 5).

Abbildung 3 | Vorbereitung der Bodenproben für die Laboranalysen: Sieb mit 2 mm Maschenweite zur Trennung von Skelett und Feinerde (Foto: René Flisch, Agroscope).

3. Bodenanalysen und Interpretation der Resultate

Eine Bodenuntersuchung ist Voraussetzung für die Erstellung eines Düngungsplanes zur bedarfsgerechten Düngung und die Schonung der Umwelt. Zu diesem Zwecke werden die Nährstoffgehalte im Boden in regelmässigen Zeitabständen (siehe Tabelle 5) bestimmt.

3.1 Empfehlungen für die Bodenuntersuchung

Für eine gezielte Düngung sind nebst den Nährstoffbedürfnissen der Pflanzen auch verschiedene Bodeneigenschaften zu berücksichtigen. Standorteigenschaften wie die Körnung müssen auf einer Parzelle in der Regel nur einmal bestimmt werden, falls keine bodenverbessernden Massnahmen durchgeführt wurden. Im Falle von langjährigen Kulturen wird eine solche Untersuchung vor der Neuanlage empfohlen.

Insbesondere bei ausdauernden Kulturen ist es wichtig, das durchwurzelte Bodenvolumen zu kennen; die Bodenuntersuchung wird daher bei Obst- und Rebkulturen vor der Erstellung der Anlage sowohl im Oberboden wie auch im Unterboden durchgeführt. Im weiteren Kulturverlauf werden nur noch Bodenproben aus dem Oberboden untersucht, ausser wenn Wachstums- oder Qualitätsschwierigkeiten festgestellt werden. Die bei den verschiedenen Kulturgruppen empfohlenen Probenahmetiefen sind in Tabelle 5 enthalten.

Die Untersuchung von Standorteigenschaften und Nährstoffgehalten in Bodenproben, wie sie für die Düngeberatung verwendet werden, basieren auf Mischproben einer repräsentativen Fläche. Die Güte der Untersuchungsergebnisse hängt wesentlich von der Probenahme ab, da Probenahmefehler die Summe aller Laborfehler um ein Mehrfaches übertreffen können. Um eine gute Mischprobe zu erhalten, kommt der Auswahl einer repräsentativen Fläche, dem Vorgehen bei der Beprobung (Einzeleinstiche) sowie dem Beprobungszeitpunkt eine besondere Bedeutung zu.

3.1.1 Auswahl einer repräsentativen Fläche

Bei der Probenahme ist darauf zu achten, dass die Proben in einem Bereich der Parzelle gestochen werden, wo Bodeneigenschaften und Wachstum der Kulturen homogen sind. Ist die Parzelle von gleichmässiger Beschaffenheit, so genügt die Entnahme einer Mischprobe. Lässt die Bewirtschaftungsweise oder der Pflanzenbestand auf grössere Verschiedenheiten des Bodens schliessen, oder unterscheiden sich einzelne Probenausstiche durch ihre Farbe oder andere Merkmale, so ist es notwendig, aus jeder in sich einheitlichen Teilfläche separate Mischproben zu entnehmen.

3.1.2 Vorgehen bei der Beprobung der festgelegten Fläche

Für die Entnahme einer repräsentativen Bodenprobe sind 20–25 Einstiche nötig, die unabhängig von der Parzellengrösse gleichmässig auf die Parzelle verteilt werden müssen (siehe Schweizerische Referenzmethoden der Forschungsanstalten Agroscope, Band 1, Agroscope 1996). Die so entnommene Probenmenge (ca. 1 kg) reicht für die vorschriftsgemässe Probenaufbereitung und Analyse im Labor aus (Abbildung 3). Es ist zu vermeiden, dass nur ein Teil der entnommenen Probe dem Labor zugestellt wird, da das Mischen und die Entnahme einer homogenen Teil-

Tabelle 5 | Empfehlungen zur Entnahme von Bodenproben in den verschiedenen Gruppen von landwirtschaftlichen Kulturen.

Der optimale Zeitpunkt der Probenahme ist abhängig von der Kulturgruppe. Der allgemein empfohlene Zeitpunkt ist nach der Ernte der Hauptkultur bzw. nach der letzten Mähnutzung (Futterbau) – in jedem Falle vor einer nachfolgenden Düngung. Siehe auch Kapitel 3.1.1 bis 3.1.4.

Kulturgruppe	Probenahme Tiefe (cm)	Zeitintervall [1]	Bemerkungen
Ackerbau	0–20	4–6 Jahre	vorzugsweise stets an der gleichen Stelle in der Fruchtfolge
Naturwiesen und Weiden	0–10	5–10 Jahre	Geilstellen, Weideeingänge, Liegeplätze und Bereich um feste Tränkeeinrichtungen nicht beproben
Gemüsebau Freiland	0–20	4–6 Jahre	vorzugsweise während der letzten Gemüsekultur im Jahresverlauf
Gemüsebau Gewächshaus	0–20	2 Jahre	vorzugsweise während der letzten Gemüsekultur im Jahresverlauf
Rebbau	2–25 (Obergrund)	5–10 Jahre	vor der Neuanlage/Remontierung und zur periodischen Kontrolle des Nährstoffgehalts. Nach grossen Düngungskorrekturen bei armen und überversorgten Böden alle 5 Jahre, sonst alle 10 Jahre
	25–50 (Untergrund)	einmalig	vor der Neuanlage/Remontierung und in Anlagen mit Kultur- und Qualitätsschwierigkeiten
Obstbau	2–25 (Obergrund)	5–10 Jahre	vor der Neuanlage/Remontierung und zur periodischen Kontrolle des Nährstoffgehalts. Probenahme an Dünge- und Anbautechniken anpassen
	25–50 (Unterboden)	einmalig	vor der Neuanlage/Remontierung und in Anlagen mit Kultur- und Qualitätsschwierigkeiten
Beerenbau	0–20	4–6 Jahre	einjährige Kulturen: vorzugsweise während der Vorkultur
	2–25	5–10 Jahre	mehrjährige Kulturen: vor der Neuanlage und zur periodischen Kontrolle des Nährstoffgehalts
Gewürz- und Medizinalpflanzen	0–20	4–6 Jahre	vorzugsweise während der Vorkultur
übrige Kulturen	0–20	ca. 5 Jahre	

[1] Bei grösseren Bodenverschiebungen, ungenügender Nährstoffversorgung bei der letzten Analyse oder bei Wachstumsstörungen ist die untere Grenze des Zeitintervalls zu verwenden.

probe ausgesprochen schwierig und aufwändig sind. Für spezielle Anbautechniken (z.B. begrünte/offene Baumstreifen, gedüngte/ungedüngte Fahrgassen im Obstbau etc.) sind Hinweise in den Kulturmodulen zu beachten.

3.1.3 Häufigkeit der Bodenuntersuchungen

Die Häufigkeit von Bodenuntersuchungen richtet sich unter anderem nach den auf der betreffenden Fläche angebauten Kulturen (Tabelle 5). Periodisch durchgeführte Bodenuntersuchungen erlauben eine Optimierung der zukünftigen Düngung und eine Kontrolle des Effektes von Düngungsmassnahmen der vergangenen Jahre.

3.1.4 Allgemeine Hinweise zur Probenahme

Eine Aussage zur Entwicklung des Nährstoffgehaltes im Boden über längere Zeit und insbesondere der Vergleich mit zugeführten und von den Pflanzen entzogenen Nährstoffmengen ist nur sinnvoll, wenn die Randbedingungen einer korrekten Bodenprobenahme (Ort, Zeitpunkt in der Fruchtfolge, Entnahmetiefe usw.) genau eingehalten werden. In diesem Sinne wird empfohlen, die Bodenproben einer Parzelle jeweils während derselben Jahreszeit, nach derselben Kultur, nach der Ernte und in jedem Falle vor einer allfälligen Düngung zu entnehmen. Im Futterbau ist ein geeigneter Zeitpunkt für die Entnahme von Bodenproben im Herbst unmittelbar nach der letzten Mähnutzung. Bei Weiden ist darauf zu achten, dass keine Einstiche in sichtbare Geilstellen gemacht werden.

Detaillierte Beschreibungen einer korrekten Probenahme bei verschiedenen Kulturgruppen – die für die Güte der Resultate entscheidend ist – sind in den Schweizerischen Referenzmethoden der Forschungsanstalten Agroscope (Agroscope 1996) enthalten. Untersuchungsstellen oder landwirtschaftliche Beratungsdienste stellen entsprechende Unterlagen ebenfalls zur Verfügung.

3.2 Methoden zur Bodenuntersuchung

Die wichtigsten zurzeit von Agroscope verwendeten Bodenuntersuchungsmethoden, die in zahlreichen Feldversuchen während Jahrzehnten geprüft wurden, sind in Tabelle 6 zusammengestellt.

3.3 Wahl der Bodenanalysemethode für die Grunduntersuchung

Standorteigenschaften wie die Körnungszusammensetzung ändern sich bei üblicher Bewirtschaftung des Bodens kaum und müssen daher nicht regelmässig analysiert wer-

Tabelle 6 | Die wichtigsten Bodenuntersuchungsmethoden von Agroscope im Hinblick auf eine optimale Gestaltung der Düngung.

Die Methodenbeschreibungen sind in den Schweizerischen Referenzmethoden der Forschungsanstalten Agroscope (Agroscope 1996) enthalten.

Untersuchungskriterium (Nährstoffelement bzw. Bodeneigenschaft)	Extraktionsmittel bzw. Verfahren/Methode	Verhältnis Boden zu Extraktionsmittel	Schüttel- bzw. Extraktionszeit	Masseinheit der Berechnung
P (CO_2-Methode)	CO_2-gesättigtes Wasser	1 : 2,5	1 Std.	P-Testzahl 1 = 0,0356 mg P_2O_5 pro 100 g Boden (bzw. 0,155 mg P pro kg Boden)
K (CO_2-Methode)	CO_2-gesättigtes Wasser	1 : 2,5	1 Std.	K-Testzahl 1 = 1 mg K_2O pro 100 g Boden (bzw. 8,3 mg K pro kg Boden)
Mg	0,0125 M $CaCl_2$	1 : 10	2 Std.	Mg-Testzahl 1 = 1 mg Mg pro 100 g Boden (bzw. 10 mg Mg pro kg Boden)
Mn, austauschbar	1 M Ammoniumacetat	1 : 10	30 Min.	mg Mn pro kg Boden
Mn, reduzierbar	1 M Ammoniumacetat + Hydrochinon	1 : 10	30 Min.	mg Mn pro kg Boden
B	Heisswasser	1 : 5	5 Min. (Rückflusskühler)	mg B pro kg Boden
H^+	destilliertes Wasser	1 : 2,5	12 Std.	pH-Wert ($pH_{[H_2O]}$)
$CaCO_3$ (Gesamtkalk)	HCl konzentriert, 1 : 1 verdünnt (volumetrisch)			Vol.-% $CaCO_3$ g $CaCO_3$ pro 100 g Boden
P, K, Mg (H_2O10-Methode)	destilliertes Wasser	1 : 10	1 Std.	mg P, K bzw. Mg pro kg Boden
P, K, Mg, Ca (AAE10-Methode)	0,5 M Ammoniumacetat + 0,5 M Essigsäure + 0,025 M Ethylendiamintetraessigsäure	1 : 10	1 Std.	mg P, K, Mg bzw. Ca pro kg Boden
Körnung [1]				
- Ton	Sedimentation			g pro 100 g Boden
- Schluff	Sedimentation			g pro 100 g Boden
- Sand	Berechnung			g pro 100 g Boden
Humus [1]	nasschemische Oxidation mit $K_2Cr_2O_7$-Titration			% organischer C (C_{org}) % Humus = % C_{org} × 1,725
Humus, Ton und Schluff (geschätzt)	Fühlprobe			%
Kationenaustauschkapazität (KAK)	in Böden mit $pH_{(H_2O)} \leq 5,9$			KAK = ($H^+ + K^+ + Ca^{2+} + Mg^{2+} + Na^+$) cmol+ pro 100 g Boden (alte Einheit: mäq/100 g Boden)
K^+, Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^+	0,05 M HCl + 0,0125 M H_2SO_4	1 : 4	5 Min.	
H^+	pH-Differenz	1 : 1	5 Min.	
Kationenaustauschkapazität (KAK)	in Böden mit $pH_{(H_2O)} > 5,9$			KAK = ($H^+ + K^+ + Ca^{2+} + Mg^{2+} + Na^+$) cmol+ pro 100 g Boden (alte Einheit: mäq/100 g Boden)
K^+, Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^+	0,1 M Bariumchlorid + 2 M Triethanolamin	1 : 25	15 Std. bei 45 °C, dann 1 Std. schütteln	
H^+	Titration			
Basensättigung (BS)	Berechnung			BS (%) = ($K^+ + Ca^{2+} + Mg^{2+} + Na^+$) cmol+ × 100 / KAK
NO_3-N NH_4-N	0,0125 M $CaCl_2$	1 : 4	1 Std.	kg N_{min} pro ha

[1] Körnung der Feinerde: Die Summe der prozentualen Anteile von Ton, Schluff, Sand und Humus ist 100 %.

den. Eine einmalige analytische Bestimmung genügt und ist einer Schätzung (Fühlprobe) vorzuziehen, da z. B. der Ton- oder Schluffgehalt wichtige Merkmale für die Interpretation der Nährstoffgehalte und das Nährstoffverhalten im Boden sind.

Für die Bestimmung der Gehalte an P, K und Mg im Boden stehen in der Schweiz verschiedene Bodenuntersuchungsmethoden für die Ermittlung der Düngebedürftigkeit zur Verfügung. Einerseits können diese Nährstoffe mit einem sogenannt milden Extraktionsmittel wie CO_2-gesättigtes Wasser für P und K (CO_2-Methode), Calciumchlorid für Mg ($CaCl_2$-Methode) oder Wasserextrakt für P, K und Mg (H_2O10-Methode), andererseits mit der aggressiveren Substanz Ammoniumacetat+Ethylendiamintetraessigsäure, auch AAE10-Methode genannt, extrahiert werden.

Mit den milden Extraktionsmitteln werden vorwiegend die löslichen, den Pflanzen unmittelbar zur Verfügung stehenden Nährstoffe des Bodens erfasst; dies entspricht dem Faktor «Intensität» , d. h. der Aktivität der Nährstoffionen in der Bodenlösung (Frossard *et al.* 2004). Im Fall eines aggressiven Extraktionsmittels geht man davon aus, dass die extrahierten Nährstoffe potenziell von den Pflanzen genutzt werden können (Nährstoffmenge, die im Boden irgendwann in Lösung gehen kann und somit pflanzenverfügbar wird); dies entspräche dem Faktor «Quantität» (Frossard *et al.* 2004).

Die mit der AAE10-Methode (Details in Kapitel 4.4) extrahierten Nährstoffe entsprechen nicht in jedem Falle dem Faktor «Quantität», da – abhängig von den Bodeneigenschaften – auch nicht pflanzenverfügbares P extrahiert wird (Demaria *et al.* 2005). So werden in kalkfreien, calciumarmen Böden nicht pflanzenverfügbare Metallphosphate (die sogenannte Reservefraktion) aufgelöst, wobei der Anteil von der mineralogischen Zusammensetzung des Bodens abhängig und daher keine abschätzbare Grösse im AAE10-Extrakt ist (Stünzi 2006b). In kalkhaltigen Böden hingegen wird $CaCO_3$ aufgelöst, d. h. es sind Ca^{2+}-Ionen in grossem Überschuss in Lösung, und die Extraktionswirkung der im AAE10 enthaltenen EDTA geht für andere Elemente verloren (Zimmermann 1997; Stünzi 2006b). Die AAE10-Extraktion ist daher nur für kalkfreie Böden geeignet.

Die Wahl der Methode für die Nährstoffbestimmung richtet sich nach den Bedürfnissen des Auftraggebers und erfolgt in Abhängigkeit der Kulturen (Tabelle 7) sowie der Verfügbarkeit eines Interpretationsschemas für die betreffende Kulturgruppe.

3.4 Interpretation von P-, K- und Mg-Bodenanalysen zur Ermittlung des Düngebedarfs

Die Interpretation von Bodenuntersuchungsresultaten wird in der Regel von den Ergebnissen von mehrjährigen Feldversuchen an verschiedenen Standorten abgeleitet (Abbildung 6). Die Beziehungen zwischen den Nährstoffgehalten im Boden und jenen in den Pflanzen bzw. die Ertragsreaktion der Pflanzen auf die Düngung sind entscheidende Kriterien für eine zuverlässige Interpretation der Bodenuntersuchungsergebnisse.

Die Ermittlung des Düngebedarfs unter Berücksichtigung des Nährstoffgehaltes des Bodens erfolgt mit Hilfe sogenannter Korrekturfaktoren, mit denen die Normdüngung (in kg Nährstoff ha^{-1} ausgedrückt) multipliziert wird. Der

Tabelle 7 | Wahl der Untersuchungsmethoden (Grundanalyse) bei verschiedenen Kulturgruppen.

	Analysierte Merkmale bzw. Elemente und Referenzmethode [1] [Methoden-Code]						
	Bodeneigenschaften				Nährstoffe (P, K, Mg, Ca) [2]		
Kulturgruppe	pH(H_2O) [pHH]	Kalk [$CaCO_3$]	Humus [C_{org}]	Körnung [KOF]	P, K, Mg [CO_2/CCMg]	P, K, Mg, Ca [AAE10] [3]	P, K, Mg [H_2O10] [4]
Ackerbau und Kunstwiesen	x	x	x	x	x	x	
Naturwiesen und Weiden	x	x	x	x	x	x	
Gemüsebau (Freiland/Gewächshaus)	x	x	x	x		x	x
Weinbau [5]	x	x	x	x		x	x
Obstbau	x	x	x	x		x	x
Beerenanbau	x	x	x	x		x	x
Gewürz- und Medizinalpflanzen	x	x	x	x			x
übrige Kulturen	x	x	x	x	x	x	x

[1] Schweizerische Referenzmethoden der Forschungsanstalten Agroscope, Band 1: Bodenuntersuchung zur Düngeberatung (Agroscope 1996).
[2] Bei speziellen Verhältnissen kann es erforderlich sein, weitere Nährstoffe zu untersuchen (z. B. B und Mn in Humusböden oder in alkalischen Böden). Methoden siehe Tabelle 6.
[3] P- und Mg-Bestimmung nur in kalkfreien Böden.
[4] P kann nur in Böden mit pH-Werten zwischen 5 und 7,8 interpretiert werden (Gysi *et al.* 1993; Gysi *et al.* 1997).
[5] Für die K-Vorratsdüngung bei Neuanlagen kann der K-Gehalt der KAK-Methode (Tabelle 6) herangezogen werden (siehe Modul 12/ Düngung im Weinbau).

Abbildung 4 | Filtration von Boden-Extrakten (Foto: Diane Bürge, Agroscope).

Abbildung 5 | Bestimmung verschiedener Elemente mittels Flammen-Atomabsorptionsspektrometrie AAS (Foto: Diane Bürge, Agroscope).

Abbildung 6 | Langzeitversuch (Versuchsbeginn 1989) mit unterschiedlicher P-, K- und Mg-Düngung als Grundlage für die Interpretation von Bodenuntersuchungsresultaten (Foto: René Flisch, Agroscope).

Tabelle 8 | Allgemeine Beurteilung des Nährstoffzustandes des Bodens aufgrund der in Tabelle 10 bis Tabelle 18 ermittelten Korrekturfaktoren.

Korrekturfaktor	Beurteilung	Versorgungsklasse
> 1,4	arm	A
1,2–1,4	mässig	B
0,9–1,1	genügend	C
0,4–0,8	Vorrat	D
< 0,4	angereichert	E

allgemeine Nährstoffzustand des Bodens für P, K und Mg kann abhängig von den Korrekturfaktoren in fünf Klassen eingeteilt werden (Tabelle 8).

Das erforderliche Nährstoffniveau des Bodens für ein optimales Wachstum der Pflanzen ist für die verschiedenen Kulturen nicht identisch. Im Acker- und Futterbau sind die Interpretationsschemata auf Kulturen mit mittlerem bis gutem Aneignungsvermögen (z. B. Sommergetreide, Raps, Sonnenblume, Erbsen) abgestimmt. In der Versorgungsklasse C (genügend) ist bei diesen Kulturen – auch ohne Düngung im aktuellen Jahr – mit keinen negativen Auswirkungen auf Ertrag und Qualität der Ernteprodukte zu rechnen. Eine Düngung in der Höhe des Pflanzenentzuges ist ausreichend, um das Gehaltsniveau im Boden zu erhalten. Bei Kulturen, die ein gutes Nährstoffaneignungsvermögen (z. B. Wintergetreide, Rüben) oder ein schlechtes Nährstoffaneignungsvermögen (Kartoffeln, Klee) haben, ist dieses Düngungsniveau nicht optimal (siehe auch Kapitel 4.6). Die Normdüngung wird daher angepasst und entspricht nicht mehr dem Entzug. Dies kann langfristig zu Abweichungen der angestrebten Bodenversorgung führen. Durch regelmässig durchgeführte Bodenuntersuchungen können Veränderungen der Bodenversorgung jedoch erkannt und korrigiert werden.

Für die Interpretation der P-, K- und Mg-Gehalte des Bodens ist die Kationenaustauschkapazität (Nährstoffspeicherungskapazität) von entscheidender Bedeutung. Zwischen der Kationenaustauschkapazität und dem Tongehalt des Bodens besteht eine enge Beziehung. Eine hohe Belegung mit mehrwertigen Kationen im Boden führt zu einer stärkeren positiven Ladung der Phosphatadsorbenten und damit zu einer elektrostatisch bedingten höheren Adsorption von Phosphat (Anion). Es ist daher sinnvoll, die P-, K- und Mg-Gehalte des Bodens in Abhängigkeit des analytisch bestimmten oder geschätzten Tongehaltes in der Feinerde (≤ 2 mm gesiebter Boden) zu beurteilen. Bei Böden mit mehr als 10 % Humus wird der Humusgehalt bei der Interpretation der Nährstoffgehalte ebenfalls berücksichtigt.

Die jeweils ermittelten Korrekturfaktoren (Kapitel 4.1 bis Kapitel 4.4) sind bei der Düngung jeder Kultur bis zur nächsten Untersuchung des Bodens zu verwenden.

4. Die Nährstoffversorgung des Bodens

Die Bemessung der P-, K- und Mg-Düngung basiert auf dem Prinzip des Ersatzes der durch die Pflanzen entzogenen Nährstoffmengen bei optimal mit diesen Nährstoffen versorgten Böden. Die Anpassung der Düngung an den Nährstoffgehalt des Bodens erfolgt mit sogenannten Korrekturfaktoren, die pro Analysenmethode und Nährstoff aus den Interpretationstabellen (Kapitel 4.1 bis 4.4) abgelesen werden können.

Die tabellarisch aufgeführten Korrekturfaktoren sind in Abhängigkeit des Analysenresultates und des Tongehaltes angegeben und gelten für Böden mit einem Humusgehalt bis zu 10 %. Da der Humusgehalt die Nährstoffverfügbarkeit ebenfalls beeinflusst, ist für Böden mit einem Humusgehalt über 10 % eine Korrektur in Abhängigkeit des Raumgewichts des Bodens (Dichte des Bodens bei natürlicher Lagerung) vorzunehmen. Letztere steht in einem engen Zusammenhang mit dem meist bekannten Humusgehalt des Bodens (Gysi *et al.* 1993). Die Faktoren können aus Tabelle 9 abgelesen oder berechnet werden.

4.1 Korrektur der P- und K-Düngung aufgrund der CO_2-Methode

Die in der Schweiz seit Jahrzehnten eingesetzte CO_2-Methode (Dirks und Scheffer 1930) eignet sich zur Bestimmung der löslichen, pflanzenverfügbaren P- und K-Gehalte im Boden. Die Beurteilung der gemessenen Gehalte

Tabelle 9 | Korrektur der Analysenwerte für Böden mit einem Humusgehalt von mehr als 10 %.

Die Korrektur ist vor der Bestimmung der Korrekturfaktoren für die Düngung (Tabelle 10 bis Tabelle 18) vorzunehmen.

Humusgehalt des Bodens (%)	Raumgewicht des Bodens	Faktor zur Korrektur des Analysenresultates	Humusgehalt des Bodens (%)	Raumgewicht des Bodens	Faktor zur Korrektur des Analysenresultates
(h)	(d_h) [1]	(f) [1]	(h)	(d_h) [1]	(f) [1]
10,0	1,1005	1,000	25,0	0,7000	0,636
11,0	1,0678	0,970	30,0	0,6020	0,547
12,0	1,0361	0,941	35,0	0,5177	0,470
13,0	1,0053	0,913	40,0	0,4452	0,405
14,0	0,9754	0,886	45,0	0,3829	0,348
15,0	0,9465	0,860	50,0	0,3293	0,299
16,0	0,9183	0,834	…	…	…
17,0	0,8911	0,810			
18,0	0,8646	0,786			
19,0	0,8389	0,762			
20,0	0,8140	0,740			

Berechnung des Raumgewichts:
$d_h = 1{,}488 * 10^{-0{,}0131 * h}$
Berechnung der Korrektur nach Humusgehalt (f):
$f = d_h / d_{h=10,0}$

[1] Werte zwischen den angegebenen Humusgehalten (h) müssen berechnet werden.

Beispiel: Analysenresultat 110,5 bei einem Boden mit 12,0 % Humus
korrigierter Analysenwert: 110,5*0,941 = 104,0 oder 110,5*(1,0361/1,1005) = 104,0

Abbildung 7 | Phosphormangel bei Zuckerrüben. Links: lückiger Bestand mit kleinen Pflanzen bei ungenügender P-Versorgung des Bodens. Rechts: normaler Bestand bei genügender Bodenversorgung zum selben Zeitpunkt (Foto: René Flisch, Agroscope).

Tabelle 10 | Korrekturfaktoren der P-Düngung in Abhängigkeit der P-Gehalte (CO_2-Methode) und des Tongehaltes des Bodens (P-Testzahl 1 = 0,155 mg P/kg Boden).

Bei Humusgehalten ≥ 10 % ist eine Humuskorrektur gemäss Tabelle 9 vorzunehmen.
Bei wenig intensiv genutzten Wiesen ist ein Korrekturfaktor von höchstens 1,0 zu verwenden.

Acker- und Futterbau

mg P/kg Boden	P-Testzahl	Tongehalt der Feinerde (%)					Spezielle schluffige Böden [1]	Spezielle sandige Böden [2]
		< 10	10–19,9	20–29,9	30–39,9	≥ 40		
0,000–0,309	**0,0–1,9**	1,5	1,5	1,5	1,4	1,2	1,5	1,4
0,310–0,619	**2,0–3,9**	1,4	1,4	1,3	1,2	1,1	1,5	1,2
0,620–0,930	**4,0–5,9**	1,2	1,2	1,1	1,0	1,0	1,4	1,0
0,931–1,241	**6,0–7,9**	1,0	1,0	1,0	1,0	0,8	1,4	1,0
1,242–1,551	**8,0–9,9**	1,0	1,0	1,0	0,8	0,6	1,2	1,0
1,552–1,862	**10,0–11,9**	1,0	1,0	0,8	0,6	0,0	1,2	0,8
1,863–2,172	**12,0–13,9**	1,0	0,8	0,6	0,0	0,0	1,0	0,6
2,173–2,482	**14,0–15,9**	0,8	0,8	0,4	0,0	0,0	1,0	0,4
2,483–2,793	**16,0–17,9**	0,8	0,6	0,0	0,0	0,0	1,0	0,4
2,794–3,103	**18,0–19,9**	0,6	0,4	0,0	0,0	0,0	1,0	0,0
3,104–3,414	**20,0–21,9**	0,6	0,4	0,0	0,0	0,0	0,8	0,0
3,415–3,724	**22,0–23,9**	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,8	0,0
3,725–4,035	**24,0–25,9**	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,6	0,0
4,036–4,345	**26,0–27,9**	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,6	0,0
4,346–4,655	**28,0–29,9**	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4	0,0
≥ 4,656	**≥ 30,0**	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

[1] Schluffige Böden aus Bündner-Schiefer-Verwitterung mit einem Tongehalt der Feinerde < 25 % und einem Schluffgehalt der Feinerde > 40 %.

[2] Sandige, saure Böden im Kanton Tessin mit einem Tongehalt der Feinerde < 10 %, einem Sandgehalt der Feinerde > 40 % und einem pH-Wert < 5,9.

konnte mithilfe einer grossen Anzahl von Feldversuchen (Abbildung 7 und Abbildung 8) abgeleitet werden. In den meisten Fällen kann eine gute Beziehung zwischen den Bodengehalten einerseits und den Erträgen und Pflanzengehalten andererseits festgestellt werden (Peyer 1970; Ryser 1982; Gallet *et al.* 2001).

In Böden mit einem Tongehalt von über 40 % werden trotz erhöhter Düngung während längerer Zeit und normaler Entwicklung und Ertragsbildung der Kulturen mit der CO_2-Methode oft nur sehr geringe Gehalte an P und/oder K ausgewiesen. Die Differenz zwischen den gedüngten und den durch die Kulturen entzogenen Nährstoffmengen steht nur in schwacher Beziehung zu den Ergebnissen der Bodenuntersuchung. Dieses Verhalten der Methode wird mit der Berücksichtigung des Tongehaltes bei der Interpretation berücksichtigt.

Die Anpassung der Düngung an den parzellenspezifischen Nährstoffgehalt des Bodens erfolgt für die CO_2-Methode mit Hilfe der in Tabelle 10 und Tabelle 11 aufgeführten Korrekturfaktoren in Abhängigkeit der P- beziehungsweise K-Gehalte sowie des Tongehaltes des Bodens. Diese Korrekturfaktoren gelten für die meisten Böden des schweizerischen Mittellandes, der Voralpen und des Juras mit einem Humusgehalt bis 10 %. Für Böden mit einem Humusgehalt über 10 % ist dieser gemäss Tabelle 9 zu berücksichtigen.

Abbildung 8 | Einfluss der Nährstoffversorgung des Bodens auf das Pflanzenwachstum (Foto: René Flisch, Agroscope).

Tabelle 11 | Korrekturfaktoren der K-Düngung in Abhängigkeit der K-Gehalte (CO_2-Methode) und des Tongehaltes des Bodens (K-Testzahl 1 = 8,3 mg K/kg Boden).

Bei Humusgehalten ≥ 10 % ist eine Humuskorrektur gemäss Tabelle 9 vorzunehmen.

Für intensive und mittelintensive Wiesen wird von Korrekturfaktoren von mehr als 1,2 ohne Analyse der K-Gehalte im Futter dringend abgeraten. Bei K-Gehalten des Futters über 25 g K/kg Trockensubstanz ist ein maximaler Korrekturfaktor von 1,0 zu verwenden.

Für wenig intensive Wiesen ist ein maximaler Korrekturfaktor von 1,0 zu verwenden.

Acker- und Futterbau

mg K/kg Boden	K-Testzahl	Tongehalt der Feinerde (%)				
		< 10	10–19,9	20–29,9	30–39,9	≥ 40
0,00–4,14	**0,0–0,4**	1,5	1,5	1,4	1,4	1,2
4,15–8,29	**0,5–0,9**	1,5	1,4	1,4	1,2	1,0
8,30–12,44	**1,0–1,4**	1,4	1,4	1,2	1,0	1,0
12,45–16,59	**1,5–1,9**	1,4	1,2	1,0	1,0	1,0
16,60–20,74	**2,0–2,4**	1,2	1,2	1,0	1,0	0,8
20,75–24,89	**2,5–2,9**	1,2	1,0	1,0	0,8	0,6
24,90–29,04	**3,0–3,4**	1,0	1,0	1,0	0,8	0,4
29,05–33,19	**3,5–3,9**	1,0	1,0	0,8	0,6	0,4
33,20–37,34	**4,0–4,4**	1,0	0,8	0,8	0,6	0,0
37,35–41,49	**4,5–4,9**	1,0	0,8	0,6	0,4	0,0
41,50–45,64	**5,0–5,4**	0,8	0,8	0,6	0,4	0,0
45,65–49,79	**5,5–5,9**	0,8	0,6	0,4	0,0	0,0
49,80–53,94	**6,0–6,4**	0,8	0,6	0,4	0,0	0,0
53,95–58,09	**6,5–6,9**	0,6	0,6	0,4	0,0	0,0
58,10–62,24	**7,0–7,4**	0,6	0,4	0,0	0,0	0,0
62,25–66,39	**7,5–7,9**	0,6	0,4	0,0	0,0	0,0
66,40–70,54	**8,0–8,4**	0,4	0,4	0,0	0,0	0,0
70,55–74,69	**8,5–8,9**	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0
74,70–78,84	**9,0–9,4**	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0
78,85–82,99	**9,5–9,9**	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
≥ 83,00	**≥ 10,0**	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Schluffige Böden aus Verwitterung von Bündner Schiefer sowie saure, sandige Böden im Kanton Tessin benötigen für P eine spezielle Beurteilung. Die entsprechenden Korrekturfaktoren für die P-Düngung sind in Tabelle 10 enthalten.

4.2 Korrektur der Mg-Düngung aufgrund der $CaCl_2$-Methode

Die Interpretation der Analysenergebnisse beziehungsweise die Korrektur der Düngung ist ähnlich wie beim K vom Tongehalt des Bodens abhängig (Tabelle 12). Aufgrund der Eigenschaften des Extraktionsmittels (Austauschlösung) steigt der Bodengehalt für die optimale Versorgung (Korrekturfaktor 1,0) mit zunehmendem Tongehalt an.

Die Mg-Bestimmung mit der $CaCl_2$-Methode ist in vielen Ländern Europas weit verbreitet. Falls bei anderen Methoden die Analysenresultate schwierig zu deuten sind, kann diese Methode wertvolle Hinweise geben, da zusätzliche Informationen aus der Literatur herangezogen werden können.

4.3 Korrektur der P-, K- und Mg-Düngung aufgrund der H_2O10-Methode

Bei der Wasserextraktionsmethode (Dirks und Scheffer 1930; Van der Paauw 1956) werden die Bodenproben mit Wasser 1:10, bezogen auf das Gewicht, extrahiert. Im Wasserextrakt werden lösliche, sofort pflanzenverfügbare Nährstoffe gemessen. Die Nährstoffgehalte im Wasserextrakt entsprechen angenähert dem Nährstoffgehalt der Bodenlösung. Bei Böden mit hohen pH-Werten (pH > 7,8) kann wegen der reduzierten P-Löslichkeit, insbesondere bei grossem Ca-Überschuss, die tatsächliche P-Verfügbarkeit besser sein, als dies Resultate der Messung im H_2O10-Extrakt wiedergeben. Für die P-Bestimmung wird die Methode nur in Böden mit einem pH-Wert ≥ 5 und ≤ 7,8 eingesetzt (Gysi *et al.* 1993; Gysi *et al.* 1997). Für Böden mit pH-Werten < 5,0 und > 7,8 liegt kein P-Interpretationsschema vor. Die Resultate dieser Bodenanalysen sind allenfalls mit Blattanalysen zu verifizieren. Für die Interpretation der Analysenresultate dieser – in der Schweiz eher selten auftretenden – Fälle sollten Kulturspezialisten von Agroscope beigezogen werden.

Tabelle 12 | Korrekturfaktoren der Mg-Düngung in Abhängigkeit des Mg-Gehaltes ($CaCl_2$-Methode) und des Tongehaltes des Bodens (Mg-Testzahl 1 = 10 mg Mg/kg Boden).

Bei Humusgehalten ≥ 10 % ist eine Humuskorrektur gemäss Tabelle 9 vorzunehmen.
Bei wenig intensiv genutzten Wiesen ist ein Korrekturfaktor von höchstens 1,0 zu verwenden.

Acker- und Futterbau

mg Mg/kg Boden	Mg-Testzahl	Tongehalt der Feinerde (%)				
		< 10	10–19,9	20–29,9	30–39,9	≥ 40
0,0–19,9	**0,0–1,9**	1,4	1,6	1,6	1,6	1,6
20,0–39,9	**2,0–3,9**	1,2	1,4	1,6	1,6	1,6
40,0–59,9	**4,0–5,9**	1,0	1,2	1,4	1,6	1,6
60,0–79,9	**6,0–7,9**	1,0	1,0	1,2	1,4	1,6
80,0–99,9	**8,0–9,9**	0,8	1,0	1,0	1,2	1,4
100,0–119,9	**10,0–11,9**	0,6	0,8	1,0	1,0	1,2
120,0–139,9	**12,0–13,9**	0,4	0,6	1,0	1,0	1,0
140,0–159,9	**14,0–15,9**	0,0	0,4	0,8	1,0	1,0
160,0–179,9	**16,0–17,9**	0,0	0,4	0,6	0,8	1,0
180,0–199,9	**18,0–19,9**	0,0	0,0	0,4	0,6	0,8
200,0–219,9	**20,0–21,9**	0,0	0,0	0,4	0,6	0,6
220,0–239,9	**22,0–23,9**	0,0	0,0	0,0	0,4	0,6
240,0–259,9	**24,0–25,9**	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4
260,0–279,9	**26,0–27,9**	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4
280,0–299,9	**28,0–29,9**	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
≥ 300,0	**≥ 30,0**	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Tabelle 13 | Korrekturfaktoren der P-Düngung in Abhängigkeit der P-Gehaltes (mg P/kg Boden, H_2O10-Methode) und des Tongehaltes des Bodens.

Bei Humusgehalten ≥ 10 % ist eine Humuskorrektur gemäss Tabelle 9 vorzunehmen.
Gilt für Böden mit einem pH-Wert von ≥ 5,0 und ≤ 7,8.

Gemüsebau, Obstbau, Beeren, Gewürz- und Medizinalpflanzen

H_2O10-P	Tongehalt der Feinerde (%) bei einem pH-Wert ≥ 5,0 und ≤ 7,8				
mg P/kg	< 10	10–19,9	20–29,9	30–39,9	≥ 40
0,0–1,9	1,5	1,5	1,5	1,4	1,4
2,0–3,9	1,5	1,4	1,4	1,2	1,2
4,0–5,9	1,4	1,2	1,2	1,0	1,0
6,0–7,9	1,2	1,0	1,0	0,8	0,8
8,0–9,9	1,2	0,8	0,8	0,4	0,4
10,0–11,9	1,0	0,6	0,6	0,0	0,0
12,0–13,9	0,8	0,4	0,4	0,0	0,0
14,0–15,9	0,8	0,4	0,0	0,0	0,0
16,0–17,9	0,6	0,0	0,0	0,0	0,0
18,0–19,9	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0
20,0–21,9	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0
22,0–23,9	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0
≥ 24,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Rebbau [1]

H_2O10-P	Tongehalt der Feinerde (%) bei einem pH-Wert ≥ 5,0 und ≤ 7,8				
mg P/kg	< 10	10–19,9	20–29,9	30–39,9	≥ 40
0,0–1,9	1,5	1,5	1,5	1,4	1,4
2,0–3,9	1,5	1,4	1,4	1,2	1,2
4,0–5,9	1,4	1,2	1,2	1,0	1,0
6,0–7,9	1,2	1,0	1,0	0,8	0,8
8,0–9,9	1,2	0,8	0,8	0,0	0,0
10,0–11,9	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0
12,0–13,9	0,8	0,0	0,0	0,0	0,0
≥ 14,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

[1] Die Korrekturfaktoren wurden unverändert aus den Grundlagen für die Düngung der Reben (Spring *et al.* 2003) übernommen.

Tabelle 14 | Korrekturfaktoren der K-Düngung in Abhängigkeit der K-Gehaltes (mg K/kg Boden, H_2O10-Methode) und des Tongehaltes des Bodens.

Bei Humusgehalten ≥ 10 % ist eine Humuskorrektur gemäss Tabelle 9 vorzunehmen.

Gemüsebau, Obstbau, Beeren, Gewürz- und Medizinalpflanzen					
H_2O10-K	Tongehalt der Feinerde (%)				
mg K/kg	< 10	10–19,9	20–29,9	30–39,9	≥ 40
0–4,9	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
5,0–9,9	1,5	1,5	1,5	1,4	1,4
10,0–14,9	1,4	1,4	1,4	1,2	1,2
15,0–19,9	1,2	1,2	1,2	1,0	1,0
20,0–24,9	1,2	1,2	1,2	0,8	0,8
25,0–29,9	1,0	1,0	1,0	0,6	0,6
30,0–34,9	1,0	1,0	1,0	0,4	0,4
35,0–39,9	1,0	1,0	1,0	0,4	0,4
40,0–44,9	0,8	0,8	0,8	0,0	0,0
45,0–49,9	0,8	0,8	0,8	0,0	0,0
50,0–54,9	0,6	0,6	0,6	0,0	0,0
55,0–59,9	0,6	0,6	0,6	0,0	0,0
60,0–64,9	0,4	0,4	0,4	0,0	0,0
65,0–69,9	0,4	0,4	0,4	0,0	0,0
70,0–74,9	0,4	0,4	0,4	0,0	0,0
≥ 75,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Rebbau [1]					
H_2O10-K	Tongehalt der Feinerde (%)				
mg K/kg	< 10	10–19,9	20–29,9	30–39,9	≥ 40
0–4,9	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
5,0–9,9	1,5	1,5	1,5	1,4	1,4
10,0–14,9	1,4	1,4	1,4	1,2	1,2
15,0–19,9	1,3	1,3	1,3	1,0	1,0
20,0–24,9	1,2	1,2	1,2	0,8	0,8
25,0–29,9	1,1	1,1	1,1	0,0	0,0
30,0–34,9	1,0	1,0	1,0	0,0	0,0
35,0–39,9	0,9	0,9	0,9	0,0	0,0
40,0–44,9	0,8	0,8	0,8	0,0	0,0
≥ 45,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

[1] Die Korrekturfaktoren wurden unverändert aus den Grundlagen für die Düngung der Reben (Spring *et al.* 2003) übernommen.

Tabelle 15 | Korrekturfaktoren der Mg-Düngung in Abhängigkeit des Mg-Gehaltes (mg Mg/kg Boden, H_2O10-Methode) und des Tongehaltes des Bodens.

Bei Humusgehalten ≥ 10 % ist eine Humuskorrektur gemäss Tabelle 9 vorzunehmen.

Gemüsebau, Obstbau, Beeren, Gewürz- und Medizinalpflanzen					
H_2O10-Mg	Tongehalt der Feinerde (%)				
mg Mg/kg	< 10	10–19,9	20–29,9	30–39,9	≥ 40
0,0–4,9	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
5,0–9,9	1,4	1,4	1,4	1,5	1,5
10,0–14,9	1,0	1,2	1,2	1,4	1,4
15,0–19,9	1,0	1,0	1,0	1,2	1,2
20,0–24,9	0,8	1,0	1,0	1,0	1,0
25,0–29,9	0,4	1,0	1,0	1,0	1,0
30,0–34,9	0,0	0,8	0,8	0,8	0,8
35,0–39,9	0,0	0,6	0,6	0,8	0,8
40,0–44,9	0,0	0,4	0,4	0,6	0,6
45,0–49,9	0,0	0,0	0,4	0,4	0,4
50,0–54,9	0,0	0,0	0,0	0,4	0,4
55,0–59,9	0,0	0,0	0,0	0,4	0,4
≥ 60,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Rebbau [1]					
H_2O10-Mg	Tongehalt der Feinerde (%)				
mg Mg/kg	< 10	10–19,9	20–29,9	30–39,9	≥ 40
0,0–4,9	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
5,0–9,9	1,4	1,5	1,5	1,5	1,5
10,0–14,9	1,1	1,2	1,2	1,4	1,4
15,0–19,9	0,8	1,1	1,1	1,2	1,2
20,0–24,9	0,0	1,0	1,0	1,1	1,1
25,0–29,9	0,0	0,8	0,8	0,9	0,9
30,0–34,9	0,0	0,0	0,0	0,8	0,8
≥ 35,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

[1] Die Korrekturfaktoren wurden unverändert aus den Grundlagen für die Düngung der Reben (Spring *et al.* 2003) übernommen.

Die Wasserextraktionsmethode kommt bislang vor allem bei landwirtschaftlichen Spezialkulturen wie dem Gemüsebau, Obstbau, Weinbau und Beerenanbau sowie in Kulturen von Medizinal- und Zierpflanzen zur Anwendung. Für den Acker- und Futterbau wurde die H_2O10-Methode im Feldversuch noch nicht kalibriert. Die Anpassung der P-, K- und Mg-Düngung erfolgt mit Hilfe der in Tabelle 13 bis Tabelle 15 aufgeführten Korrekturfaktoren in Abhängigkeit der parzellenspezifischen Nährstoffgehalte sowie des Tongehaltes des Bodens. Für Böden mit einem Humusgehalt ≥ 10 % ist dieser gemäss Tabelle 9 zu berücksichtigen.

4.4 Korrektur der P-, K- und Mg-Düngung aufgrund der AAE10-Methode

Zahlreiche Untersuchungen über die chemischen Prozesse bei der Extraktion mit Ammoniumacetat+EDTA (Hons *et al.* 1990; Zbíral 2000) im Verhältnis 1 : 10 (AAE10) haben gezeigt, dass sich das Extraktionsverhalten dieser Methode in kalkfreien, calciumarmen Böden grundsätzlich von demjenigen in kalkhaltigen, calciumreichen Böden unterscheidet. Dies macht sich vor allem bei der Bestimmung von P bemerkbar (Stünzi 2006b; siehe auch Kapitel 3.3). In kalkfreien Böden wird die kleine Menge Ca^{2+} durch die Ethylendiamintetraessigsäure (EDTA) komplexiert, womit eine Ausfällung von Calciumphosphat unterbunden wird, und das Phosphat in Lösung bleibt. Ist die Ca^{2+}-Konzentration sehr tief, können durch die freie EDTA zusätzlich Metallphosphate (Reservefraktion) aufgelöst werden. Dieser Anteil ist zudem von der mineralogischen Zusammensetzung des Bodens abhängig und daher keine abschätzbare Grösse im AAE10-Extrakt.
Bei der AAE10-Extraktion in kalkhaltigen Böden wird $CaCO_3$ aufgelöst, d. h. es sind Ca^{2+}-Ionen in grossem Überschuss in Lösung, wodurch die Extraktionswirkung der EDTA für andere Elemente verloren geht (Zimmermann 1997). Bei steigendem Kalkgehalt sinkt die Löslichkeit von P im AAE10-Extrakt graduell, wobei je nach Probe die P-Löslichkeit durch Kalk geringfügig bis drastisch (auf $^1/_{20}$) reduziert wird.

Die beschriebenen chemischen Prozesse erklären die mangelhafte Übereinstimmung der Interpretationen von P-Bestimmungen mit der CO_2- und der AAE10-Methode (Walther et al., 2001; Flisch et al., 2009). Parallel zur CO_2-Methode wurde die AAE10-Methode in Feldversuchen geprüft (Abbildung 9). In kalkfreien Böden ergeben sich für die beiden Methoden ähnliche Beziehungen zwischen Bodengehalt und Ertrag bzw. Pflanzengehalt. Beim P bestehen bei sauren Böden mit einem erhöhten Gehalt an Fe- und Al-Phosphaten gewisse Unsicherheiten bei der Interpretation der P-Gehalte im AAE10-Extrakt, da nicht abgeschätzt werden kann, ob und wie viele Metallphosphate während der Extraktion gelöst wurden. In solchen Böden gibt die AAE10-Extraktion manchmal nicht reproduzierbare P-Gehalte. In kalkhaltigen Böden sind die Beziehungen der mit den beiden Methoden bestimmten Bodengehalte zur Reaktion der Pflanzen teilweise ähnlich (Abbildung 10), teilweise jedoch stark unterschiedlich. Mit AAE10 kann der Gehalt an pflanzenverfügbarem P sowohl unterschätzt als auch überschätzt werden. Da nicht abschätzbar ist, an welchem Standort welche chemischen Prozesse während der Extraktion hauptsächlich zum Tragen kommen, sind mit der AAE10-Methode in kalkhaltigen Böden keine zuverlässige Aussagen über die P-Bedürftigkeit möglich.

Abbildung 9 | Die K-Versorgung von Chicorée-Wurzeln im Feld ist entscheidend für die Qualität der Chicorée-Zapfen. Sowohl bei unter- (links) als auch bei überversorgtem Boden (rechts) ist der Anteil an offenen, nicht vermarktungsfähigen Zapfen erhöht, verglichen mit Zapfen bei genügend versorgtem Boden (Mitte, Versorgungsklasse C) (Fotos: René Flisch, Agroscope).

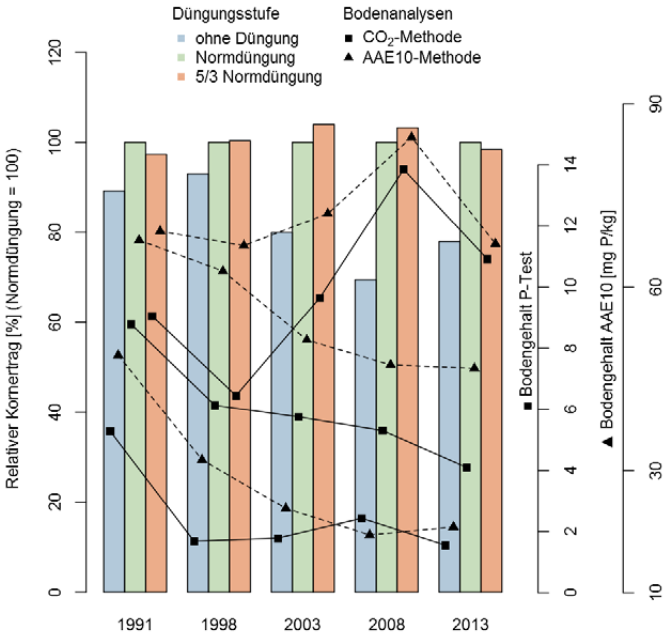

Abbildung 10 | Entwicklung der P-Gehalte (CO_2- und AAE10-Methode) im Boden bei unterschiedlicher P-Düngung (ohne P, Normdüngung, $^5/_3$ der Normdüngung) und Einfluss auf die Kornerträge von Weizen. Der Langzeitversuch von Agroscope in Zürich-Reckenholz wurde 1989 in einem Boden mit 2 % Humus und 22 % Ton gestartet. Die Düngung erfolgte seit Versuchsbeginn in mineralischer Form (Grafik: René Flisch, Agroscope).

Ähnliches dürfte für das Mg zutreffen, wobei für eine gesicherte Aussage zu wenige Daten verfügbar sind. Vergleiche mit der in vielen Ländern eingesetzten $CaCl_2$-Methode zeigen, dass gerade in kalkhaltigen Böden oft grosse Abweichungen der im AAE10-Extrakt bestimmten Mg-Gehalte vorhanden sind, die mit der Düngungspraxis der vergangenen Jahre, der Betriebsstruktur und den Mg-Gehalten der Pflanzen nicht erklärbar sind. Die Methoden unterscheiden sich bezüglich Mg prinzipiell, weil bei AAE10 die hohe Essigsäurekonzentration Mg aus Dolomit lösen kann, während bei der $CaCl_2$-Extraktion ein reiner Ionenaustausch stattfindet.

Die Anpassung der Düngung an den parzellenspezifischen Nährstoffgehalt des Bodens erfolgt für P, K und Mg mit Hilfe der in Tabellen 16 bis 18 aufgeführten Korrekturfaktoren in Abhängigkeit der P-, K- und Mg-Gehalte sowie des Tongehaltes des Bodens. Für Böden mit einem Humusgehalt ≥ 10 % sind die Angaben in Tabelle 9 zu beachten.

Tabelle 16 | Korrekturfaktoren der P-Düngung in Abhängigkeit der P-Gehalte (mg P/kg Boden, AAE10-Methode) und des Tongehaltes des Bodens für kalkfreie Böden
(Kalkvorprobe negativ oder pH < 6,8 oder AAE10-Ca < 4000 mg Ca/kg Boden).

Bei Humusgehalten ≥ 10 % ist eine Humuskorrektur gemäss Tabelle 9 vorzunehmen.

Für kalkhaltige Böden (Kalkvorprobe positiv oder pH ≥ 6,8 oder AAE10-Ca ≥ 4000 mg Ca/kg Boden) sind die Korrekturfaktoren für die Bemessung der P-Düngung nicht gültig.

Bei wenig intensiv genutzten Wiesen ist ein Korrekturfaktor von höchstens 1,0 zu verwenden.

Acker- und Futterbau					
AAE10-P	Tongehalt der Feinerde (%); kalkfreie Böden				
mg P/kg	< 10	10–19,9	20–29,9	30–39,9	≥ 40
0–4,9	1,5	1,5	1,5	1,4	1,4
5,0–9,9	1,5	1,5	1,4	1,4	1,2
10,0–14,9	1,5	1,4	1,4	1,2	1,2
15,0–19,9	1,4	1,4	1,2	1,2	1,2
20,0–24,9	1,4	1,2	1,2	1,2	1,0
25,0–29,9	1,2	1,2	1,2	1,0	1,0
30,0–34,9	1,2	1,2	1,0	1,0	1,0
35,0–39,9	1,2	1,0	1,0	1,0	1,0
40,0–44,9	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
45,0–49,9	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
50,0–54,9	1,0	1,0	1,0	1,0	0,8
55,0–59,9	1,0	1,0	1,0	0,8	0,8
60,0–64,9	1,0	1,0	0,8	0,8	0,8
65,0–69,9	1,0	0,8	0,8	0,8	0,6
70,0–74,9	0,8	0,8	0,8	0,6	0,6
75,0–79,9	0,8	0,8	0,6	0,6	0,6
80,0–84,9	0,8	0,6	0,6	0,6	0,4
85,0–89,9	0,6	0,6	0,6	0,4	0,4
90,0–94,9	0,6	0,6	0,4	0,4	0,4
95,0–99,9	0,6	0,4	0,4	0,4	0,0
100,0–104,9	0,4	0,4	0,4	0,0	0,0
105,0–109,9	0,4	0,4	0,0	0,0	0,0
110,0–114,9	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0
115,0–119,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
120,0–124,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
≥ 125,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Gemüse-, Obstbau, Gewürz- und Medizinalpflanzen					
AAE10-P	Tongehalt der Feinerde (%); kalkfreie Böden				
mg P/kg	< 10	10–19,9	20–29,9	30–39,9	≥ 40
0–4,9	1,5	1,5	1,5	1,4	1,4
5,0–9,9	1,5	1,5	1,4	1,4	1,4
10,0–14,9	1,5	1,4	1,4	1,4	1,4
15,0–19,9	1,5	1,4	1,4	1,4	1,2
20,0–24,9	1,4	1,4	1,4	1,2	1,2
25,0–29,9	1,4	1,4	1,2	1,2	1,2
30,0–34,9	1,4	1,2	1,2	1,2	1,2
35,0–39,9	1,4	1,2	1,2	1,2	1,0
40,0–44,9	1,2	1,2	1,2	1,0	1,0
45,0–49,9	1,2	1,2	1,0	1,0	1,0
50,0–54,9	1,2	1,0	1,0	1,0	1,0
55,0–59,9	1,2	1,0	1,0	1,0	1,0
60,0–64,9	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
65,0–69,9	1,0	1,0	1,0	1,0	0,8
70,0–74,9	1,0	1,0	1,0	0,8	0,8
75,0–79,9	1,0	1,0	0,8	0,8	0,8
80,0–84,9	1,0	0,8	0,8	0,8	0,8
85,0–89,9	1,0	0,8	0,8	0,8	0,4
90,0–94,9	0,8	0,8	0,8	0,4	0,4
95,0–99,9	0,8	0,8	0,4	0,4	0,4
100,0–104,9	0,8	0,4	0,4	0,4	0,0
105,0–109,9	0,4	0,4	0,4	0,0	0,0
110,0–114,9	0,4	0,4	0,0	0,0	0,0
115,0–119,9	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0
120,0–124,9	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0
≥ 125,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Rebbau [1]					
AAE10-P	Tongehalt der Feinerde (%); kalkfreie Böden				
mg P/kg	< 10	10–19,9	20–29,9	30–39,9	≥ 40
0–4,9	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
5,0–9,9	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
10,0–14,9	1,5	1,5	1,5	1,4	1,4
15,0–19,9	1,5	1,5	1,5	1,3	1,3
20,0–24,9	1,5	1,4	1,4	1,2	1,2
25,0–29,9	1,5	1,4	1,4	1,0	1,0
30,0–34,9	1,5	1,3	1,3	0,9	0,9
35,0–39,9	1,5	1,3	1,3	0,8	0,8
40,0–44,9	1,4	1,2	1,2	0,0	0,0
45,0–49,9	1,4	1,1	1,1	0,0	0,0
50,0–54,9	1,4	1,0	1,0	0,0	0,0
55,0–59,9	1,4	1,0	1,0	0,0	0,0
60,0–64,9	1,3	0,9	0,9	0,0	0,0
65,0–69,9	1,3	0,9	0,9	0,0	0,0
70,0–74,9	1,3	0,8	0,8	0,0	0,0
75,0–79,9	1,3	0,8	0,8	0,0	0,0
80,0–84,9	1,2	0,0	0,0	0,0	0,0
85,0–89,9	1,1	0,0	0,0	0,0	0,0
90,0–94,9	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0
95,0–99,9	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0
100,0–104,9	0,9	0,0	0,0	0,0	0,0
105,0–109,9	0,9	0,0	0,0	0,0	0,0
110,0–114,9	0,8	0,0	0,0	0,0	0,0
115,0–119,9	0,8	0,0	0,0	0,0	0,0
120,0–124,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
≥ 125,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

[1] Die Korrekturfaktoren wurden unverändert aus den Grundlagen für die Düngung der Reben (Spring *et al.* 2003) übernommen.

Tabelle 17 | Korrekturfaktoren der K-Düngung in Abhängigkeit des K-Gehaltes (mg K/kg Boden, AAE10-Methode) und des Tongehaltes des Bodens.

Bei Humusgehalten ≥ 10 % ist eine Humuskorrektur gemäss Tabelle 9 vorzunehmen.

Für intensive und mittelintensive Wiesen wird von Korrekturfaktoren von mehr als 1,2 ohne Analyse der K-Gehalte im Futter dringend abgeraten.
Bei K-Gehalten des Futters über 25 g K/kg Trockensubstanz ist ein maximaler Korrekturfaktor von 1,0 zu verwenden.

Für wenig intensive Wiesen ist ein maximaler Korrekturfaktor von 1,0 zu verwenden.

Acker- und Futterbau

AAE10-K	Tongehalt der Feinerde (%)				
mg K/kg	< 10	10–19,9	20–29,9	30–39,9	≥ 40
0–19,9	1,5	1,5	1,4	1,4	1,2
20–39,9	1,5	1,4	1,4	1,4	1,2
40–59,9	1,4	1,4	1,3	1,2	1,0
60–79,9	1,4	1,2	1,2	1,2	1,0
80–99,9	1,2	1,2	1,2	1,0	1,0
100–119,9	1,2	1,2	1,0	1,0	1,0
120–139,9	1,2	1,0	1,0	1,0	0,8
140–159,9	1,0	1,0	1,0	1,0	0,8
160–179,9	1,0	1,0	1,0	0,8	0,8
180–199,9	1,0	1,0	0,8	0,8	0,6
200–219,9	1,0	0,8	0,8	0,8	0,6
220–239,9	0,8	0,8	0,8	0,6	0,6
240–259,9	0,8	0,8	0,6	0,6	0,4
260–279,9	0,8	0,6	0,6	0,6	0,4
280–299,9	0,6	0,6	0,6	0,4	0,0
300–319,9	0,6	0,6	0,4	0,4	0,0
320–339,9	0,6	0,4	0,4	0,0	0,0
340–359,9	0,4	0,4	0,0	0,0	0,0
360–379,9	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0
380–399,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
400–419,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
≥ 420	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Gemüse-, Obstbau, Gewürz- und Medizinalpflanzen

AAE10-K	Tongehalt der Feinerde (%)				
mg K/kg	< 10	10–19,9	20–29,9	30–39,9	≥ 40
0–19,9	1,5	1,5	1,5	1,4	1,2
20–39,9	1,5	1,4	1,4	1,4	1,2
40–59,9	1,4	1,4	1,4	1,2	1,2
60–79,9	1,4	1,2	1,2	1,2	1,0
80–99,9	1,2	1,2	1,2	1,0	1,0
100–119,9	1,2	1,2	1,0	1,0	1,0
120–139,9	1,2	1,0	1,0	1,0	1,0
140–159,9	1,0	1,0	1,0	1,0	0,8
160–179,9	1,0	1,0	1,0	0,8	0,8
180–199,9	1,0	1,0	0,8	0,8	0,8
200–219,9	1,0	0,8	0,8	0,8	0,8
220–239,9	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
240–259,9	0,8	0,8	0,8	0,6	0,6
260–279,9	0,8	0,6	0,6	0,6	0,6
280–299,9	0,8	0,6	0,6	0,4	0,4
300–319,9	0,6	0,6	0,6	0,4	0,4
320–339,9	0,6	0,4	0,4	0,4	0,0
340–359,9	0,6	0,4	0,4	0,0	0,0
360–379,9	0,4	0,4	0,0	0,0	0,0
380–399,9	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0
400–419,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
≥ 420	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Rebbau

AAE10-K	Tongehalt der Feinerde (%)				
mg K/kg	< 10	10–19,9	20–29,9	30–39,9	≥ 40
0–19,9	1,5	1,5	1,5	1,4	1,4
20–39,9	1,5	1,5	1,5	1,4	1,4
40–59,9	1,5	1,4	1,4	1,2	1,2
60–79,9	1,5	1,4	1,4	1,2	1,2
80–99,9	1,4	1,2	1,2	1,0	1,0
100–119,9	1,4	1,2	1,2	1,0	1,0
120–139,9	1,2	1,0	1,0	1,0	1,0
140–159,9	1,2	1,0	1,0	0,8	0,8
160–179,9	1,0	1,0	1,0	0,8	0,8
180–199,9	1,0	0,8	0,8	0,8	0,8
200–219,9	1,0	0,8	0,8	0,0	0,0
220–239,9	0,8	0,8	0,8	0,0	0,0
240–259,9	0,8	0,0	0,0	0,0	0,0
260–279,9	0,8	0,0	0,0	0,0	0,0
280–299,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
300–319,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
320–339,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
340–359,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
360–379,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
380–399,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
400–419,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
≥ 420	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Tabelle 18 | Korrekturfaktoren der Mg-Düngung in Abhängigkeit des Mg-Gehaltes (mg Mg/kg Boden, AAE10-Methode) und des Tongehaltes des Bodens für kalkfreie Böden
(Kalkvorprobe negativ oder pH < 6,8 oder AAE10-Ca < 4000 mg Ca/kg Boden).

Bei Humusgehalten ≥ 10 % ist eine Humuskorrektur gemäss Tabelle 9 vorzunehmen.

Für kalkhaltige Böden (Kalkvorprobe positiv oder pH ≥ 6,8 oder AAE10-Ca ≥ 4000 mg Ca/kg Boden) sind die Korrekturfaktoren für die Bemessung der Mg-Düngung nicht gültig.

Bei wenig intensiv genutzten Wiesen ist ein Korrekturfaktor von höchstens 1,0 zu verwenden.

Acker- und Futterbau					
AAE10-Mg	Tongehalt der Feinerde (%); kalkfreie Böden				
mg Mg/kg	< 10	10–19,9	20–29,9	30–39,9	≥ 40
0–24,9	1,2	1,2	1,4	1,5	1,5
25–49,9	1,2	1,2	1,4	1,4	1,5
50–74,9	1,2	1,2	1,4	1,4	1,4
75–99,9	1,0	1,2	1,2	1,2	1,4
100–124,9	1,0	1,0	1,2	1,2	1,4
125–149,9	0,8	1,0	1,0	1,2	1,2
150–174,9	0,8	1,0	1,0	1,0	1,2
175–199,9	0,4	0,8	1,0	1,0	1,2
200–224,9	0,4	0,8	0,8	1,0	1,0
225–249,9	0,4	0,6	0,8	1,0	1,0
250–274,9	0,0	0,6	0,6	0,8	1,0
275–299,9	0,0	0,4	0,6	0,8	1,0
300–324,9	0,0	0,0	0,4	0,6	0,8
325–349,9	0,0	0,0	0,4	0,6	0,8
350–374,9	0,0	0,0	0,0	0,4	0,6
375–399,9	0,0	0,0	0,0	0,4	0,6
400–424,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4
425–449,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
≥ 450	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Gemüse-, Obstbau, Gewürz- und Medizinalpflanzen					
AAE10-Mg	Tongehalt der Feinerde (%); kalkfreie Böden				
mg Mg/kg	< 10	10–19,9	20–29,9	30–39,9	≥ 40
0–24,9	1,2	1,4	1,4	1,5	1,5
25–49,9	1,2	1,4	1,4	1,5	1,5
50–74,9	1,2	1,2	1,4	1,4	1,5
75–99,9	1,0	1,2	1,2	1,4	1,4
100–124,9	1,0	1,2	1,2	1,2	1,4
125–149,9	1,0	1,0	1,2	1,2	1,4
150–174,9	0,8	1,0	1,0	1,2	1,2
175–199,9	0,6	1,0	1,0	1,0	1,2
200–224,9	0,6	0,8	1,0	1,0	1,2
225–249,9	0,4	0,8	0,8	1,0	1,0
250–274,9	0,4	0,6	0,8	1,0	1,0
275–299,9	0,4	0,6	0,8	0,8	1,0
300–324,9	0,4	0,4	0,6	0,8	1,0
325–349,9	0,0	0,4	0,6	0,6	0,8
350–374,9	0,0	0,4	0,4	0,6	0,8
375–399,9	0,0	0,0	0,4	0,4	0,6
400–424,9	0,0	0,0	0,0	0,4	0,6
425–449,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4
≥ 450	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Rebbau[1]					
AAE10-Mg	Tongehalt der Feinerde (%); kalkfreie Böden				
mg Mg/kg	< 10	10–19,9	20–29,9	30–39,9	≥ 40
0–24,9	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
25–49,9	1,4	1,5	1,5	1,5	1,5
50–74,9	1,2	1,5	1,5	1,5	1,5
75–99,9	1,0	1,4	1,4	1,5	1,5
100–124,9	0,8	1,3	1,3	1,4	1,4
125–149,9	0,0	1,1	1,2	1,3	1,4
150–174,9	0,0	0,9	1,0	1,3	1,3
175–199,9	0,0	0,8	0,9	1,2	1,3
200–224,9	0,0	0,0	0,8	1,1	1,2
225–249,9	0,0	0,0	0,0	1,0	1,1
250–274,9	0,0	0,0	0,0	0,9	1,0
275–299,9	0,0	0,0	0,0	0,8	0,9
300–324,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,8
325–349,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
350–374,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
375–399,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
400–424,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
425–449,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
≥ 450	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

[1] Die Korrekturfaktoren wurden unverändert aus den Grundlagen für die Düngung der Reben (Spring *et al.* 2003) übernommen.

4.5 Die Ermittlung des Düngebedarfs an P, K und Mg

Die Grundlage zur Ermittlung des Düngebedarfes an P, K und Mg ist die Bodenuntersuchung, die eine Einschätzung der Bodenversorgung zulässt. Sie dient insbesondere dazu, die Bodengehalte auf das gewünschte Niveau (Versorgungsklasse C) einzustellen. Das Vorgehen zur Ermittlung des Düngebedarfs kann Abbildung 11 entnommen werden:

Der Nährstoffentzug entspricht dem Entzug der gesamten Pflanze (Bruttoentzug durch Pflanzenteile, die potenziell das Feld verlassen können), da für ein optimales Pflanzenwachstum alle Pflanzenteile mit Nährstoffen aus dem Boden versorgt werden müssen. Der Bedarf der Pflanzenwurzeln, die auf dem Feld bleiben, wird nicht berücksichtigt. Die Werte, die für die Ermittlung des Düngebedarfs bei den einzelnen Kulturen einzusetzen sind, können aus den Kulturmodulen entnommen werden. Sie sind mit Normdüngung bezeichnet.

4.6 Spezielle Hinweise zum Einsatz von P-, K- und Mg-Düngern

Das **Nährstoffaneignungsvermögen** der verschiedenen Kulturpflanzen ist unterschiedlich. Es hängt stark von der Form und der Länge des Wurzelsystems ab. Der optimale Nährstoffgehalt, der in enger Beziehung zur Nährstoffkonzentration in der Bodenlösung steht, ist daher je nach Kulturart verschieden.

Der **optimale Nährstoffgehalt des Bodens** bezüglich P, K und Mg wurde auf Pflanzenarten mit einem mittleren bis guten Nährstoffaneignungsvermögen abgestimmt. Bei diesen Kulturen entspricht die Düngung dem Entzug der Pflanzen. Wintergetreide und Gräser haben mit ihrem sehr feinen und weit verzweigten Wurzelsystem ein sehr gutes Nährstoffaneignungsvermögen. Dies gilt auch für tiefwurzelnde Kulturen (z. B. Rüben), die einen grossen Teil des K tieferen Bodenschichten entnehmen. In diesen Fällen kann die Düngung in einem genügend versorgten Boden (Ver-

Düngebedarf	=	Normdüngung der Kultur [1]	*	Korrekturfaktor
(kg P/ha, kg K/ha, kg Mg/ha)		(kg P/ha, kg K/ha, kg Mg/ha)		(gemäss Kapitel 4.1 bis 4.4)
Wird gedeckt durch: - Ernterückstände Vorkultur - Hofdünger - Recyclingdünger - Mineraldünger		Entspricht dem gesamten Entzug und wird berechnet aus dem Ertrag (standortkorrigiert) und dem Nährstoffgehalt der Pflanze (ohne auf dem Feld verbleibende Wurzeln), korrigiert mit kulturspezifischen Eigenschaften. (siehe Module der Kulturgruppen)		Korrektur zur Erreichung bzw. Erhaltung der gewünschten Bodenversorgung (Versorgungsklasse C), abhängig von: - Analysenmethode - Kulturgruppe

[1] Die Normdüngung der Kulturen ist in den Kulturmodulen aufgeführt.

Abbildung 11 | Schema zur Ermittlung des Düngebedarfs an P, K und Mg.

Abbildung 12 | Phosphormangel bei jungen Maispflanzen. Rotfärbung der Blätter und Rückstand in der Entwicklung (links) im Vergleich zu ausreichend versorgten Pflanzen bei Versorgungsklasse C (rechts) zum selben Zeitpunkt (Foto: René Flisch, Agroscope).

Abbildung 13 | Kaliummangel bei Kartoffeln. Gelbfärbung mit anschliessender Nekrose beginnend beim Blattrand auf älteren Blättern (Foto: René Flisch, Agroscope).

sorgungsklasse C) geringer als der Nährstoffentzug sein, ohne dass negative Auswirkungen zu erwarten sind. Im Gegensatz dazu benötigen Pflanzen mit einem schwächer ausgebildeten Wurzelsystem (z. B. Kartoffeln oder flachwurzelnde Gemüsearten) eine höhere Nährstoffkonzentration in der Bodenlösung. Damit auch diese Pflanzen ihren Nährstoffbedarf decken können, ist die Nährstoffkonzentration in der Bodenlösung zeitlich befristet zu erhöhen: Eine allfällig erhöhte Düngermenge ist im Düngungsplan bei den Folgekulturen zu berücksichtigen.

Mineralische P-Dünger werden in der Regel vor der Grundboden- oder vor der Saatbettbereitung ausgebracht. Bezüglich Wahl der P-Form sind die Angaben im Modul 4/ Eigenschaften und Anwendung von Düngern, Kapitel 4.2.2, zu beachten.

Um **K-Luxuskonsum** durch einige Futterpflanzen zu verhindern, der meist den Mg-Gehalt in der Pflanze verringert, sind mineralische K-Gaben von mehr als etwa 200 kg K_2O/ha in zwei Teilgaben auszubringen (z. B. bei Vegetationsbeginn und nach der zweiten Nutzung). Im Acker- und Gemüsebau sind mögliche Salzschäden bei empfindlichen Kulturpflanzen und/oder ein K-Überschuss in den Pflanzen zu verhindern, indem K-Gaben in mineralischer Form auf 300 kg K_2O/ha beschränkt werden. Höhere K-Gaben sind mit Vorteil teilweise in Form von Hofdünger oder zu einer Gründüngung zu verabreichen. Auf sandigen Böden ist die K-Düngung im Spätwinter oder Frühjahr durchzuführen; dadurch können nennenswerte K-Verlagerungen in tiefere, nicht durchwurzelbare Bodenschichten verhindert werden. Bei der Wahl der mineralischen Dünger sind ihre Zusammensetzung und Eigenschaften zu beachten, insbesondere bei chlorempfindlichen Kulturen (siehe Modul 4/ Eigenschaften und Anwendung von Düngern, Kapitel 4.2).

Mg ist im Boden relativ mobil. Daher ist Folgendes zu beachten, um **Mg-Auswaschungsverluste** zu vermeiden: Wasserlösliche Mg-Dünger (Magnesiumsulfat) sind – ähnlich wie N-Dünger – kurz vor einem grösseren Bedarf der Kulturen einzusetzen. Zur Verbesserung der mittel- und langfristigen Mg-Versorgung des Bodens sind mindestens teilweise weniger lösliche Mg-Formen wie Magnesiumoxid (MgO) oder Magnesiumkarbonat (z. B. $MgCO_3$ in Dolomitkalk) zu wählen (siehe Modul 4/ Eigenschaften und Anwendung von Düngern, Kapitel 4.2.4).

Bei **Betrieben mit überversorgten Böden**, kombiniert mit Tierhaltung, fallen unter Umständen Nährstoffmengen in Hofdüngern an, die den Düngebedarf deutlich übersteigen. Grundsätzlich müssten auf solchen Betrieben die überflüssigen Nährstoffe weggeführt werden. Eine konsequente Wegfuhr überschüssiger Nährstoffe in Hofdüngern (z. B. P bei phosphorüberversorgten Böden) kann jedoch dazu führen, dass dadurch ein Defizit bei einem anderen Nährstoff (z. B. N) entsteht. In solchen Fällen ist ein agronomisch und ökologisch vertretbarer Kompromiss für die Hofdüngerverteilung innerhalb des Betriebes und der Hofdüngerwegfuhr zu finden. Eine Düngung über 80 % des Pflanzenbedarfs (Korrekturfaktor 0,8) soll bei ausschliesslicher Fütterung mit betriebseigenen Futtermitteln nicht überschritten werden. Erfolgt die Fütterung auch mit betriebsfremden Futtermitteln (inkl. Kraftfutter!), ist aus der Sicht einer optimalen Ernährung der Pflanzen und aus ökologischen Gründen mit dem aufgrund des Bodengehaltes korrigierten Düngebedarf zu rechnen, d. h. die überschüssigen Nährstoffe bzw. Hofdünger sind vom Betrieb wegzuführen.

Ein geeignetes Hilfsmittel für Hofdüngerverschiebungen ist das im Landwirtschaftsgesetz verankerte Informationssystem HODUFLU (BLW 2012).

4.7 Weitere Nährstoffe und Spurenelemente

4.7.1 Stickstoff

Die Bestimmung des mineralischen N-Gehaltes des Bodens (N_{min}) dient der Optimierung der N-Düngung, insbesondere im Acker- und Gemüsebau. Die kultur- und zeitbezogene Berücksichtigung des N_{min}-Gehaltes des Bodens bei der Bemessung der N-Gaben ist in den Modulen zu den einzelnen Kulturgruppen dargestellt. Die N_{min}-Methode kann auch zur Untersuchung ökologischer Fragestellungen gute Dienste leisten, z. B. zur Beurteilung des im Herbst nach der Ernte im Boden verbleibenden und auswaschungsgefährdeten mineralischen N. Sie ist jedoch nicht geeignet, um nach der Düngung oder nach der Ernte einer Kultur nachträglich die Zweckmässigkeit der verabreichten N-Düngung zu beurteilen.

4.7.2 Schwefel

Im Zuge der Umstellung auf fossile Brennstoffe mit reduziertem S-Gehalt hat in Westeuropa der Ausstoss von S in die Atmosphäre deutlich abgenommen. Bis in die Achtzigerjahre konnte die mit dem Niederschlagswasser eingetragene S-Menge (30–50 kg S/ha, teilweise bis zu 100 kg S/ha) selbst bei schwefelbedürftigen Kulturarten einen hohen Anteil des S-Bedarfes decken. Verschiedenen Infor-

Abbildung 14 | Schwefelmangel bei Kohlrabi (schwefelfreie Düngung in der Bildmitte): Die Anwendung von sulfathaltigen P-, K- und Mg-Düngern trägt zur Verhinderung von S-Mangel bei (Foto: Hanspeter Buser, Agroscope).

mationsquellen zufolge liegt der jährliche S-Eintrag aus der Luft heute in vielen Regionen unter 10 kg S/ha.

Die organische Substanz des Bodens ist gegenwärtig die wichtigste natürliche S-Quelle. Mit Ernterückständen, Hof- und Recyclingdüngern wird dem Boden wieder organisch gebundener S zugeführt.

Nicht selten treten heute bei schwefelbedürftigen Kulturarten wie Raps, verschiedenen Kohlgewächsen, Leguminosen und Liliengewächsen wie Zwiebeln und Lauch Symptome von S-Mangel in Erscheinung, da der weitaus grösste Teil des S-Vorrates im Boden in organischer Form vorliegt (Humus, organische Dünger) und vor der Aufnahme durch die Pflanzen mineralisiert werden muss. Die Mineralisierung läuft parallel zur N-Mineralisierung. Das dabei entstehende Sulfat (SO_4^{2-}) verhält sich im Boden sehr ähnlich dem Nitrat; es ist ebenso auswaschungsgefährdet wie das Nitrat.

Erfahrungsgemäss treten Engpässe in der S-Versorgung bei schwefelbedürftigen Kulturen vor allem im Frühjahr auf. In niederschlagsreichen Gebieten, wie sie in der Schweiz vorherrschend sind, wird ein grosser Teil des im Spätherbst im Oberboden noch vorhandenen pflanzenverfügbaren Sulfates in tiefere Bodenschichten verlagert. Dort ist es für die Wurzeln der meisten Kulturarten im darauf folgenden Frühjahr nicht mehr erreichbar. Bei den zu Vegetationsbeginn noch tiefen Bodentemperaturen setzt die Mineralisierung von S aus der organischen Substanz erst verzögert ein.

Abgesehen von humusarmen Böden ist S-Mangel während der Sommer- und Herbstmonate selbst bei schwefelbedürftigen Arten eher selten, da bei den erhöhten Bodentemperaturen aus der organischen Bodensubstanz fortlaufend Sulfat durch Mineralisierung freigesetzt wird. Während sehr niederschlagsreicher Perioden und unmit-

Tabelle 19 | Kriterien zur Beurteilung des S-Angebots des Bodens mit Hilfe einer Punkteskala.

Kriterien	Ausprägung des Kriteriums	Punkte zur S-Versorgung
Humusgehalt des Bodens (%)	< 2	1
	2–5	3
	> 5	5
Tongehalt des Bodens (%)	< 10	1
	10–20	2
	20–30	3
	> 30	5
Skelettgehalt des Bodens (Volumen-%)	> 30	1
	10–30	3
	< 10	5
pflanzennutzbare Gründigkeit des Bodens (cm)	10–30	1
	31–70	5
	> 70	7
Niederschläge von Oktober (Vorjahr) bis März (mm)	> 540	1
	370–540	3
	< 370	5
Hofdüngereinsatz	nie	1
	weniger als einmal in drei Jahren	3
	mindestens einmal in drei Jahren	5
Abweichung der gedüngten von der vorgesehenen N-Menge [1]	Erhöhung > 40 kg N/ha	1
	Abweichung +/–40 kg N/ha	3
	Reduktion > 40 kg N/ha	5

[1] N-Düngemenge abgeleitet mit Hilfe der Schätz- oder der N_{min}-Methode (siehe Kulturmodule).

Tabelle 20 | Korrekturfaktoren der S-Düngung nach S-Angebot des Bodens und S-Entzug der Kulturen.

S-Bedarf der Kultur [1]	Punktezahl für das S-Angebot des Bodens (Tabelle 19)	Korrekturfaktor für den S-Bedarf der Kultur [1]
Starkbedürftige Kulturen: > 60 kg S/ha		
z. B. Raps, Leguminosen, Kohlkopfarten, Sellerie	< 15	0,75
	15–23	0,50
	> 23	0,25 [2]
Mittelbedürftige Kulturen: 25–60 kg S/ha		
z. B. Getreide, Zucker- und Futterrüben, Mais, Erbsen, Bohnen, Grünland, Spargeln, Zwiebeln	< 14	0,70
	14–20	0,50
	> 20	0
Wenigbedürftige Kulturen: < 25 kg S/ha		
z. B. Kartoffel, Kopf- und Feldsalat	< 13	0,5
	13–18	0
	> 18	0

[1] Der S-Bedarf (S-Entzug, Normdüngung) der Kulturen ist in den Kulturmodulen enthalten oder kann bei den Kulturverantwortlichen von Agroscope nachgefragt werden.

[2] Korrekturfaktor = 0, nur falls mehr als einmal in drei Jahren schwefelhaltige, organische Dünger (z. B. Hofdünger) eingesetzt werden.

telbar anschliessend können dennoch Engpässe in der S-Versorgung eintreten.

Verschiedene Düngungsversuche haben gezeigt, dass sich S-Mangel in kritischen Phasen durch die Anwendung der Hauptnährstoffe P, K und Mg in der Sulfatform (Superphosphat, Kaliumsulfat, Patentkali etc.) wirksam verhindern lässt (Abbildung 14). Auch N-Gaben in Form von Ammonsulfat leisten einen zusätzlichen Beitrag zur Deckung des S-Bedarfes.

Die Pflanze nimmt den S in Form von Sulfat auf. Es ist daher naheliegend, das Sulfat im Extrakt von N_{min}-Proben zu bestimmen (S_{min}-Methode). Das Ergebnis wird in der Regel als S_{min}-Wert bezeichnet. Die Interpretation der S_{min}-Werte scheint jedoch aufgrund der Erfahrungen in Deutschland deutlich weniger sicher als diejenige der N_{min}-Werte zu sein.
Als Alternative zu S_{min} kann durch die Kombination von Eigenschaften verschiedener Einflussfaktoren des Standorts und der Bewirtschaftung das Potenzial zur Deckung des S-Bedarfs der Kulturpflanzen ausreichend genau abgeschätzt werden. Als Grundlage dienen dabei der Humus-, Ton- und Skelettgehalt sowie die Gründigkeit des Bodens, die Winter- und Frühjahrsniederschläge, die Häufigkeit des Hofdüngereinsatzes und die gedüngte N-Menge (Tabelle 19). Der S-Düngebedarf kann in Abhängigkeit des geschätzten S-Angebots aus dem Boden und dem S-Bedarf der Kulturen (siehe Kulturmodule) abgeleitet werden (Tabelle 20; Pellet *et al.* 2003a und 2003b).

4.7.3 Spurenelemente (Mikronährstoffe)

Bei hohen Erträgen und speziellen Boden- und Bewirtschaftungsbedingungen können auch Spurennährstoffe ins Minimum geraten. In Ausnahmefällen (anspruchsvolle Kulturen, erhöhtes Mangelrisiko) ist es notwendig, den Gehalt an Spurenelementen, insbesondere B und Mn, im Boden zu bestimmen.

Spurenelemente werden im Vergleich zu den Hauptnährstoffen in geringen Mengen aufgenommen. Der Bedarf variiert zwischen den einzelnen Spurenelementen deutlich. Bezüglich der Feldabfuhr mit den Ernteprodukten nimmt Fe mit bis zu 1 kg/ha eine Spitzenstellung ein, gefolgt von Mn, B, Zn und Mo, die von den meisten Kulturarten in Mengen von wenigen Gramm je Hektare aufgenommen werden. Es sei angemerkt, dass es sich bei diesen Angaben um Grössenordnungen handelt und dass die Aufnahme von Spurenelementen stark kulturabhängig ist.

Sand- und Moorböden weisen von Natur aus niedrige Gehalte an Spurenelementen auf. Die meisten übrigen acker- und gemüsebaulich genutzten Böden enthalten ausreichende Reserven an Spurenelementen. Ungünstige pH-Werte, Bodenverdichtung, Bodenvernässung oder Trockenheit schränken jedoch deren Löslichkeit im Boden und die Pflanzenverfügbarkeit stark ein.

Die Pflanzenverfügbarkeit von Spurenelementen lässt sich durch eine schonende Bodenbearbeitung, eine bedarfsgerechte Bewässerung und die Steuerung des pH-Wertes durch gezielte Düngungsmassnahmen verbessern. Durch eine standortangepasste Auswahl der Düngerformen sowie eine gezielte Kalkung muss der pH-Wert so weit wie möglich im optimalen Bereich stabilisiert werden (siehe Kapitel 5).

In kurzfristigen Mangelsituationen steht die Anwendung von Spurenelementen durch Blattdüngung im Vordergrund. Dabei ist zu beachten, dass die Spanne zwischen Mangel und Überversorgung bei Spurenelementen sehr eng ist. Bei ungezielter Anwendung von spurenelementhaltigen Düngern können leicht Überschusssituationen eintreten, die bei empfindlichen Kulturen oftmals mit Pflanzenschäden verbunden sind.

Bewässerte, sandige oder sehr saure, respektive sehr alkalische und humusreiche Böden neigen wegen Auswaschung, respektive Festlegung, zu B- und Mn-Mangel. Viele der verwendeten Mehrnährstoffdünger enthalten B; beim Verzicht auf die Düngung mit borhaltigen Düngern erhöht sich die Gefahr von B-Mangel (Abbildung 15).

Unter speziellen Bedingungen ist eine Düngung mit B oder Mn notwendig. Zu borbedürftigen Kulturen (Rüben, Raps, Sonnenblumen, Reben) ist eine B-Gabe in der Grössenordnung von 1,5–2 kg B pro Hektare empfehlenswert. An dieser Stelle sei ausdrücklich darauf hingewiesen, dass unsachgemässe Kalkgaben zu ernsthaften Schwierigkeiten bezüglich der B- und Mn-Versorgung der Pflanzen führen können. Tabelle 21 gibt Auskunft über die Interpretation der Bodenuntersuchungsergebnisse und die Bemessung allfälliger B- oder Mn-Gaben aufgrund einer Bodenanalyse in Abhängigkeit des Humusgehaltes, der Bodenreaktion und der Bedürftigkeit der Kulturen.

Abbildung 15 | Bormangel (z. B. nach zu hohen Kalkgaben) führt bei Zuckerrüben zu Herzfäule (Foto: René Flisch, Agroscope).

Nebst B und Mn ist eine Düngung mit Spurenelementen nur unter ganz speziellen Standort- oder Produktionsbedingungen notwendig. Die Untersuchung des Bodens auf weitere Spurenelemente ist nur ausnahmsweise nach Rücksprache mit Beratungsdiensten oder Agroscope angezeigt.

Tabelle 21 | Bemessung der B- und Mn-Düngung aufgrund von Bodenuntersuchungsergebnissen, der Bodeneigenschaften und der Bedürftigkeit der Kulturen (Analysemethoden siehe Tabelle 6).

Nährstoff	Gehalt des Bodens (mg/kg)		Bezeichnung	Versorgungsklasse	Humusgehalt des Bodens < 10 %		Humusgehalt des Bodens ≥ 10 %			
							Saure und schwach saure Böden		Neutrale und alkalische Böden	
					Wenig bedürftige Kulturen	Bedürftige Kulturen[1]	Wenig bedürftige Kulturen	Bedürftige Kulturen[1]	Wenig bedürftige Kulturen	Bedürftige Kulturen[1]
Bor (B)	< 0,6		arm	A	1,5–2,0 kg B/ha*	2,5–3,0 kg B/ha*	1,5–2,0 kg B/ha*	2,5–3,0 kg B/ha*	1,5–2,0 kg B/ha*	2,5–3,0 kg B/ha*
	0,6–1,5		mässig	B	–	1,5–2,0 kg B/ha*	–	2,0–2,5 kg B/ha*	–	2,0–2,5 kg B/ha*
	1,6–2,0		genügend	C	–	1,0 kg B/ha*		1,0 kg B/ha*		1,0 kg B/ha*
	2,1–5,0		Vorrat	D	–	–	–	–	–	–
	> 5,0		angereichert	E	–	–	–	–	–	–
Mangan (Mn)	austauschbar	leicht reduzierbar								
	< 2		arm	A	20–40 kg Mn/ha*	30–50 kg Mn/ha*	30–50 kg Mn/ha*	40–60 kg Mn/ha*	10–15 kg/ha Mangansulfat[2]	
	> 2	< 50	mässig	B	20–40 kg Mn/ha*	20–40 kg Mn/ha*	20–40 kg Mn/ha*	20–40 kg Mn/ha*	10–15 kg/ha Mangansulfat[2]	
	> 2	> 50	genügend	C	–	–	–	–	–	–

[1] B: Rüben, Raps, Sonnenblumen, Sellerie, Reben, Kernobst, Steinobst; Mn: Getreide, Leguminosen, Spinat, Rüben, Kernobst, Steinobst.

[2] Eine Bodendüngung ist unter diesen Bodenverhältnissen meistens wirkungslos. → Blattdüngung (in 600–1000 l Wasser). Oft ist eine mehrmalige Anwendung dieser Mengen notwendig. Anstelle von Mangansulfat können auch andere für die Blattdüngung geeignete Mn-Dünger eingesetzt werden (Gehalte und Anwendungsvorschriften beachten).

* Bodendüngung: B kann als Borax gestreut, als Borsäure gespritzt (auf den Boden!) oder in Form von ausreichend borhaltigen Mehrnährstoffdüngern ausgebracht werden.

5. Kalkung

Der Kalkzustand des Bodens ist ein wichtiger Faktor für die nachhaltige landwirtschaftliche Landnutzung. Er wird entscheidend durch das Muttergestein, aus dem der Boden entstanden ist, durch die Niederschlagsverhältnisse sowie durch die Bewirtschaftungsweise bestimmt, und er beeinflusst verschiedene für das Pflanzenwachstum wichtige Bodenprozesse (siehe Kapitel 2.4).

Kalkverluste treten vor allem durch Auswaschung, den Neutralisationsbedarf im Boden sowie den Entzug von Ca durch die Kulturen auf. Die jährlichen Kalkverluste können einige bis mehrere Hundert Kilogramm $CaCO_3$ pro Hektare betragen und werden meist durch den Einsatz von Hof- und Recyclingdüngern, kalkhaltigen Mineraldüngern oder sporadischen kleinen Kalkgaben (Erhaltungskalkung) kompensiert. Zur Verbesserung des Kalkzustandes mehr oder weniger saurer Böden ist eine gezielte Kalkdüngung notwendig (Aufkalkung). Die Höhe und Häufigkeit der Kalkgaben ist vom pH-Wert, der Basensättigung und der Bodenart abhängig. Es ist zu beachten, dass durch Kalkgaben der pH-Wert des Bodens erhöht wird und damit die Verfügbarkeit gewisser Nährstoffe verändert werden kann.

Kalkdünger sind basisch wirksame Stoffe, die sowohl die Konzentration der Wasserstoff-Ionen (H^+) verringern und damit den pH-Wert steigen lassen als auch die Sorption der Ca^{2+}- bzw. Mg^{2+}-Ionen erhöhen. Diese Eigenschaften besitzen Calciumoxide (CaO), Calciumhydroxide ($Ca(OH)_2$) oder Calcium- bzw. Magnesiumkarbonate ($CaCO_3$, $MgCO_3$). Die Kalkmengen sind gemäss internationaler Usanz in der Form CaO (Calciumoxid) angegeben. Die neutralisierende Wirkung erfolgt durch die Verbindungen Calciumkarbonat ($CaCO_3$) und Calciumhydroxid ($Ca(OH)_2$), das im Boden aus CaO entstehen kann.

Summenformeln für die Neutralisationswirkung von Kalkdüngern:

$$CaCO_3 + 2\ H^+ \rightarrow Ca^{2+} + CO_2 + H_2O$$

$$CaO + H_2O + 2\ H^+ \rightarrow Ca(OH)_2 + 2\ H^+ \rightarrow Ca^{2+} + H_2O$$

Beim Gips ($CaSO_4 \cdot 2\ H_2O$) handelt es sich nicht um einen Kalkdünger, da er den pH-Wert des Bodens nicht verändert, sondern um einen Ca-/S-Dünger.

5.1 Bemessung der Kalkgaben aufgrund des pH-Wertes

Wird eine Verbesserung des Kalkzustandes angestrebt, kann eine grobe Bemessung der notwendigen Kalkgabe aufgrund des $pH_{(H_2O)}$-Wertes des Bodens vorgenommen werden (Tabelle 22). Es ist zu beachten, dass der Kalkbedarf mit steigendem Tongehalt zunimmt, mit steigendem Humusgehalt hingegen abnimmt.

Tabelle 22 | Grobe Bemessung von Kalkgaben aufgrund des pH-Wertes und des Tongehaltes des Bodens sowie der Bodennutzung.

Ton-, Humusgehalt	$pH_{(H_2O)}$ des Bodens	Aufkalkung [1] dt CaO/ha		Erhaltungskalkung dt CaO/ha alle 4–5 Jahre	Erhaltungskalkung dt CaO pro Hektare und Jahr
		Ackerbau Feldgemüse Rebbau Obstbau	Naturwiesen	Naturwiesen	Obstbau
< 10 % Ton	< 5,3	20	10	–	2,5–3,0
	5,3–5,8	15	7,5 [2]	5–7 [3]	1,0–2,5
	5,9–6,2	10	5 [2]	5–7 [3]	0,5–1,0
	> 6,2	0	0	–	0–0,75
10–20 % Ton	< 5,3	25	12,5	–	3,0–4,0
	5,3–5,8	20	10	6–9 [3]	1,5–2,5
	5,9–6,2	15	7,5	6–9 [3]	0,75–1,25
	> 6,2	0	0	–	0–1,0
20–30 % Ton	< 5,3	30	15	–	3,5–4,25
	5,3–5,8	25	12,5 [2]	8–10 [3]	2,5–3,5
	5,9–6,2	20	10 [2]	8–10 [3]	1,0–1,5
	> 6,2	0	0	–	0–1,25
> 30 % Ton	< 5,3	35	20	–	5–6
	5,3–5,8	30	17,5 [2]	9–12 [2]	2–5
	5,9–6,7	25	15 [2]	9–12 [2]	1–2
	> 6,7	0	0	–	0–1,5
≥ 10 % Humus		0	0	–	

[1] Im Futterbau sind Pflanzenbestand und an den Standort angepasste Pflanzenarten zu berücksichtigen. Im Obstbau wird der Ca-Gehalt des AAE10-Extraktes für die Kalkung nicht mehr berücksichtigt (Bertschinger *et al.* 2003). Das Ziel der Kalkung ist die Veränderung des pH-Wertes (H^+-Ionen) und nicht des Ca-Gehaltes im Boden.

[2] In der Regel genügt eine Erhaltungskalkung alle vier bis fünf Jahre.

[3] Die Erhaltungskalkung wird empfohlen, falls eine fortschreitende Versauerung beobachtet wird.

Als Hilfsmittel zur Bemessung der Erhaltungskalkung kann nebst dem Bedarf der Kulturen die Wirkung der eingesetzten Mineraldünger abgeschätzt werden. Die theoretische saure bzw. alkalische Wirkung eines Düngers – ausgedrückt in Kilogramm CaO – kann mit der Formel nach Sluijsmans (1970) wie folgt berechnet werden:

$$E\ (kg\ CaO) = 1{,}0 \times CaO + 1{,}4 \times MgO + 0{,}6 \times K_2O + 0{,}9 \times Na_2O - 0{,}4 \times P_2O_5 - 0{,}7 \times SO_3 - 0{,}8 \times Cl - n \times N$$

(n = 0,8 für Wiesen und 1,0 für offenes Ackerland)

Bei positivem E ist eine basische und bei negativem E eine saure Wirkung vorhanden.

5.2 Bemessung der Kalkgaben aufgrund der Kationenaustauschkapazität und der Basensättigung

Tonkolloide und die organische Substanz adsorbieren an ihrer negativ geladenen Oberfläche Kationen aus der Bodenlösung. Sinkt die Konzentration der Kationen in der Bodenlösung ab, tauschen die Ton-Humus-Komplexe die Nährstoffe wieder mit der Bodenlösung; die Nährstoffe können dann von den Wurzeln aufgenommen werden.

Die Basensättigung (BS) gibt den Prozentanteil der Austauschplätze gemäss Kationenaustauschkapazität (KAK) an, die mit den Kationen (Ca^{2+}, Mg^{2+}, K^{+}, Na^{+}) belegt sind. Je geringer die BS, desto grösser ist die Wasserstoffionenkonzentration in der Bodenlösung respektive der Säuregrad des Bodens, was bei der Bestimmung des Kalkbedarfes zu berücksichtigen ist.

Für eine gezieltere Bemessung der Kalkgaben dient die KAK bzw. die daraus errechnete BS des Bodens als Grundlage. Die Beurteilung des Kalkzustandes in Abhängigkeit dieser beiden Bodeneigenschaften sowie der Bewirtschaftung ist in Tabelle 23 und Tabelle 24 (Walther *et al.* 1987; Collaud *et al.* 1990) dargestellt. Es ist zu beachten, dass bei futterbaulicher Nutzung des Bodens in der Regel bei einer BS unter 50 % eine Kalkdüngung notwendig sein kann. Bei den übrigen Kulturen liegt der entsprechende Wert bei 60 %.

Tabelle 23 | Beurteilung des Kalkzustandes des Bodens aufgrund der Basensättigung.

Basensättigung (%)			Bezeichnung des Kalkzustandes des Bodens	Versorgungsklasse
Offenes Ackerland und Kunstwiesen	Naturwiesen	Rebbau Obstbau		
< 40	< 30	< 40	sehr arm	A
40–49	30–39	40–49	arm	A
50–59	40–49	50–59	mässig	B
60–79	50–79	60–79	genügend	C
≥ 80	≥ 80	≥ 80	Vorrat	D

Tabelle 24 | Bemessung von Kalkgaben aufgrund der Basensättigung und der Kationenaustauschkapazität des Bodens.

Die Gaben wurden für die Bodenschicht von 0–20 cm Tiefe berechnet. Werden tiefere Bodenschichten aufgekalkt (z. B. bei Neuanlagen im Reb- und Obstbau), sind die angegebenen Mengen entsprechend anzupassen. Die Umrechnungsfaktoren für verschiedene Kalkformen sind im Modul 4/ Eigenschaften und Anwendung von Düngern, Tabelle 14, enthalten.

Basensättigung (%)			Kalkgabe (dt CaO/ha) je nach Kationenaustauschkapazität (cmol+/100 g Boden) [1]			
Offenes Ackerland und Kunstwiesen	Naturwiesen	Rebbau Obstbau	< 10	10–14,9	15–19,9	≥ 20
≥ 60	≥ 50	≥ 60	0	0	0	0
50–59	40–49	50–59	7,3	12,5	15,5	20,0 [2]
40–49	30–39	40–49	10,0	19,0	21,5 [2]	28,0 [2]
< 40	< 30	< 40	13,0	24,5 [2]	27,5 [2]	36,0 [2]

[1] Früher wurde anstelle von cmol+/100 g die Einheit mäq/100 g verwendet. Die Werte bleiben dieselben.

[2] Aufteilung auf zwei bis drei Gaben im Abstand von zwei bis vier Jahren. Vor dem Ausbringen der zweiten bzw. dritten Gabe ist eine erneute Bestimmung des pH-Wertes des Bodens empfehlenswert.

5.3 Spezielle Hinweise zur Kalkung

5.3.1 Ackerbau

Der optimale pH-Bereich unserer landwirtschaftlichen Kulturen liegt in einem relativ weiten Bereich zwischen sauer und schwach alkalisch. Ist eine Kalkung nötig, wird sie innerhalb der Fruchtfolge vorzugsweise zu kalkliebenden oder kalkverträglichen Kulturen durchgeführt. Häufigere, kleinere Gaben sind hohen Einzelgaben vorzuziehen, um das Risiko der Immobilisierung von Spurenelementen oder einen «Kalkschock» bei empfindlichen Kulturen zu vermeiden.

Kulturspezifische Kalkgaben bei einem pH-Wert des Bodens über 6,2 sind mit einigen Risiken behaftet und daher nur ausnahmsweise (maximal 10–15 dt CaO/ha) zu verabreichen. Insbesondere in Fruchtfolgen mit Kartoffeln ist auf kulturspezifische Kalkgaben zu verzichten, um wesentliche Ertragseinbussen bei der genannten Kultur – ohne sichtbare Mängel am wachsenden Bestand – zu vermeiden.

5.3.2 Futterbau

Die optimalen pH-Werte liegen für die Naturwiesen meist unter denjenigen für den Ackerbau. Die meisten futterbaulich wertvollen Wiesenpflanzen gedeihen am besten bei schwach saurer bis saurer Bodenreaktion ($pH_{[H_2O]}$ 5,5–6,7). In diesem pH-Bereich sind auch die meisten Nährstoffe gut pflanzenverfügbar. Unter unseren Klimabedingungen neigen die Böden zu einer langsam fortschreitenden Versauerung. Die Geschwindigkeit dieser Versauerung hängt von den Standortverhältnissen sowie von der Art der Düngung ab. Dies gilt auch für futterbaulich genutzte Böden (Jeangros 2008), weshalb eine regelmässige Kontrolle des pH-Wertes wichtig ist. Sinkt der Boden-pH unter ca. 5,5 (Luzerne: 6,5), nimmt das Wachstum der Leguminosen und ihre symbiontische N-Fixierung ab, was zu einer Ertragsreduktion führen kann. Um dieser natürlichen Versauerung entgegenzuwirken, ist der regelmässige Einsatz kalkhaltiger bzw. basisch wirkender N-, P- und Mg-Dünger und/oder kleinerer Kalkgaben (Erhaltungskalkung) empfehlenswert (Tabelle 22).

Bei pH-Werten unter etwa 5,5 und einer nicht optimalen botanischen Zusammensetzung des Pflanzenbestandes (z. B. einem zu geringen Leguminosenanteil) ist unter Berücksichtigung der Basensättigung eine gezielte Aufkalkung ins Auge zu fassen (Tabelle 24). Unter solchen Bedingungen kann die Korrektur des pH-Wertes einen positiven Effekt auf den Leguminosenanteil und/oder den Anteil guter Futtergräser haben. Allgemein ist darauf zu achten, dass Kalkmengen von mehr als 15 dt CaO/ha auf mehrere Gaben im Abstand von jeweils zwei Jahren aufgeteilt werden. Der Ca-Gehalt im Futter erlaubt keine gesicherte Aussage über den Säuregrad des Bodens oder den Kalkbedarf, da der Ca-Gehalt des Futters sehr stark von der botanischen Zusammensetzung beeinflusst wird.

Eine Aufkalkung wird im Futterbau bei Böden mit einem pH-Wert über 5,5 oder bei tieferen pH-Werten und ausgeglichenem Pflanzenbestand nicht empfohlen. Verschiedene Versuchsreihen haben gezeigt, dass bei pH-Werten über etwa 5,5 nur sehr selten ein positiver Effekt der Kalkdüngung auf den Ertrag der Wiesen beobachtet werden kann (Schechtner 1993; Fabre und Kockmann 2006; Huguenin-Elie *et al.* 2015). Zu hohe Kalkmengen führen sogar zu einer Verschlechterung der Nährstoffverfügbarkeit (ab einem pH über ca. 7,0).

Bevor eine Aufkalkung auf Futterbauflächen durchgeführt wird, empfiehlt es sich, die zu erwartenden Vorteile in Abhängigkeit der vorliegenden Situation abzuschätzen:

- In Regionen mit weniger futterwüchsigem Klima, wo die intensiv nutzbaren Gräser fehlen, wird die Futterproduktion durch die Temperatur, Niederschlagsmenge, Vegetationsdauer und die Dauer der Schneedeckung stark eingeschränkt. Gräser, die unter weniger günstigen Bedingungen noch vorkommen, sind weniger intensiv nutzbar, ertragsschwächer und haben deshalb einen kleineren Nährstoffbedarf. Je schlechter die klimatischen Voraussetzungen für das Wachstum sind, desto kritischer sind die Erfolgsaussichten einer Aufkalkung zu beurteilen.
- Degenerierte Pflanzenbestände als Folge von Nährstoffüberschüssen, nicht standortgerechter Nutzung oder Bodenverdichtungen können mit Kalk nicht verbessert werden. Bei intensiv genutzten Naturwiesen auf schwach sauren bis sauren Standorten eignet sich die Kalkung alleine nicht, um etablierte Bestandesanteile von scharfem oder kriechendem Hahnenfuss zurückzudrängen (Huguenin-Elie *et al.* 2015).

5.3.3 Gemüsebau, einjährige Beerenkulturen, Gewürz- und Medizinalpflanzen

Bei diesen Kulturgruppen spielt die Versorgung mit P und Spurenelementen eine entscheidende Rolle. Die Verfügbarkeit dieser Elemente ist gesamthaft betrachtet bei pH-Werten zwischen 6,0 und 7,0 optimal (Abbildung 2).

In basischen Böden liegt ein erhöhter Anteil des P in Form von schwer löslichen Calciumphosphaten vor. Mit steigendem pH-Wert nimmt die Verfügbarkeit der Spurenelemente Fe, Mn, B, Zn und Cu ab, diejenige von Mo nimmt zu. Eine Bodenversauerung ist mit einem deutlichen Anstieg der Löslichkeit von Mn und Al verbunden, was in vernässten Böden bei empfindlichen Gemüsearten, zum Beispiel bei Salaten, Symptome von Toxizität auslösen kann (Neuweiler 2011).

Die Erhaltungskalkung hat möglichst in kleine Einzelgaben, unterteilt vor dem Anlegen von Zwischenbegrünungen bzw. kalkliebenden Kulturen wie gepflanzten Kohlarten, zu erfolgen, um allfällige negative Auswirkungen eines kurzfristigen Anstieges des pH-Wertes bei empfindlicheren Kulturen zu vermeiden.

Beerenkulturen sowie Gewürz- und Medizinalpflanzen haben je nach Art sehr unterschiedliche Bedürfnisse bezüglich pH-Wert und Kalkzustand des Bodens (Carlen 2007) für eine qualitativ und quantitativ zufriedenstellende Produktion. Die Wahl eines geeigneten Standortes kann unter Umständen sinnvoller sein als die Korrektur des pH-Wertes.

5.3.4 Rebbau

Im Rebbau wird bei pH-Werten unter 5,9 eine Aufkalkung empfohlen. Liegt der pH-Wert zwischen 5,9 und 6,5, kann eine Aufkalkung in Frage kommen, meist genügt aber die Verwendung eines kalkhaltigen Düngers im Rahmen der jährlichen Düngung (Erhaltungskalkung). Die Verwendung kalkhaltiger Dünger wird auch bei pH-Werten zwischen 6,5 und 7,0 empfohlen, insbesondere wenn die regelmässigen Bodenanalysen eine Tendenz zur Abnahme des pH-Wertes zeigen. Viele Schweizerische Rebbauböden nördlich der Alpen haben pH-Werte über 7,0. In diesen Fällen wird eine Kalkung oder die Verwendung kalkhaltiger Dünger nicht empfohlen.

Bei einer Remontierung ist die Aufkalkung auch in tieferen Bodenschichten möglich. Hohe Kalkmengen können dabei notwendig werden, wobei grobe Ausmahlungsformen bevorzugt werden. Die Kalkdünger sind in mindestens 30–40 cm Tiefe einzuarbeiten. Wenn immer möglich sollte die Aufkalkung während der Remontierung vorgenommen werden, um Nährstoffungleichgewichte bei bestehenden Kulturen in den obersten Zentimetern des Bodens zu vermeiden. Wenn dennoch eine höhere Kalkgabe unverzichtbar ist, soll diese auf höchstens 20 dt CaO/ha mit grober Ausmahlung des Kalkdüngers beschränkt und auf zwei bis vier Jahre verteilt in den Boden eingearbeitet werden.

Die Aufkalkung kann auch nur unter Berücksichtigung des pH-Wertes erfolgen, obwohl dieses Vorgehen weniger genau, dafür aber einfacher ist (Tabelle 22). Die Wahl der Düngerform ist die gleiche wie oben beschrieben.

Besonders wichtig ist die Kenntnis des Kalkgehaltes im Hinblick auf die Wahl von Rebunterlagen. Bei diesen ist die Kalkverträglichkeit sehr unterschiedlich, weshalb sie gezielt aufgrund der vorliegenden Bodenverhältnisse ausgewählt werden müssen. Alternativ zum Gesamtkalkgehalt

wird im Ausland teilweise der Aktivkalk in der Ton- und Schlufffraktion bestimmt.

5.3.5 Obstbau

Im Obstbau ist ein pH-Wert zwischen 6,0 und 7,5 ideal. Von der Bodenreaktion sind wiederum die biologische Aktivität und die Verfügbarkeit der meisten Nährstoffe abhängig. Eine Erhöhung des pH-Wertes kann über eine Kalkung erfolgen, während eine Absenkung des pH-Wertes, zum Beispiel durch Mulchen oder konsequente Verwendung sauer wirkender Dünger, schwierig ist.

Die in Tabelle 22 angegebenen, jährlichen Kalkmengen entsprechen einer Erhaltungskalkung. Für Aufkalkungen sind grössere Kalkmengen erforderlich, die aufgrund der Basensättigung und der Kationenaustauschkapazität berechnet werden. Für die Berechnung einer Aufkalkung sollte ein Experte beigezogen werden.

Da eine Kalkung die Verfügbarkeit von Spurenelementen negativ beeinflussen oder zu Aufnahmekonkurrenz (Antagonismus) mit anderen Nährstoffen führen kann, ist die Notwendigkeit einer Kalkgabe für jeden Standort abzuwägen. Eine übermässige Kalkgabe ist in jedem Fall zu vermeiden.

5.3.6 Beerenkulturen

Für die meisten Beerenkulturen ist ein pH-Wert zwischen 6,0 und 7,5 ideal. Bei höherem pH ist mit Chlorose zu rechnen, bedingt durch die schlechtere Aufnahme von Fe und Mn. Einen abweichenden pH-Optimalbereich haben die Heidelbeeren. Für einen erfolgreichen Anbau von Heidelbeeren braucht es Böden mit einem pH zwischen 4 bis 5, die reich an organischer Substanz sind. Allerdings können Heidelbeeren auch in Böden mit pH-Werten von 6 bis 6,5 angebaut werden, sofern diese kalkfrei sind. In der Schweiz sind solche Böden ausser im Tessin selten zu finden. Falls der pH-Wert nicht angepasst ist, werden für den Anbau von Heidelbeeren aufwändige Bodenzubereitungen notwendig.

6. Bodenfruchtbarkeit und Humusbewirtschaftung

6.1 Der Begriff Bodenfruchtbarkeit

Die Erhaltung und Förderung der Bodenfruchtbarkeit ist ein wichtiges Ziel der Düngung. Deshalb wird in diesem Kapitel der Zusammenhang zwischen Düngung und Bodenfruchtbarkeit erläutert und speziell die Humusbewirtschaftung behandelt. Grundlage für die Beurteilung der Bodenfruchtbarkeit bildet die Definition in der schweizerischen Gesetzgebung (VBBo 1998). Boden gilt als fruchtbar, wenn:

- er eine für seinen Standort typische artenreiche, biologisch aktive Lebensgemeinschaft und typische Bodenstruktur sowie eine ungestörte Abbaufähigkeit aufweist
- natürliche und vom Menschen beeinflusste Pflanzen und Pflanzengesellschaften ungestört wachsen und sich entwickeln können und ihre charakteristischen Eigenschaften nicht beeinträchtigt werden
- die pflanzlichen Erzeugnisse eine gute Qualität aufweisen und die Gesundheit von Menschen und Tieren nicht gefährden
- Menschen und Tiere, die ihn direkt aufnehmen, nicht gefährdet werden

Die Definition ist weit gefasst und bezieht sich deshalb nicht nur auf bewirtschaftete Böden, sondern auch auf Böden natürlicher Biotope.

Für die Beurteilung der Bodenfruchtbarkeit werden in der Regel die verschiedenen Bodenfunktionen beurteilt. Kurz gesagt: Ein Boden gilt dann als fruchtbar, wenn er seine Funktionen den Standortverhältnissen entsprechend erfüllt.

6.2 Bodenfunktionen und Bodeneigenschaften

Im Bodenkonzept für die Landwirtschaft in der Schweiz (Candinas *et al.* 2002), das die notwendigen Grundlagen für die Beurteilung der nachhaltigen Bodennutzung vorstellt, werden sowohl die Funktionen als auch die Eigenschaften von Böden beschrieben.

Mit Ausnahme der Landschaftsvielfalt und des Baugrundes sind Bodenfunktionen (Wasserspeicher, Wärmespeicher, Stoffspeicher, Filterwirkung, CO_2-Senke etc.) an eine oder mehrere chemische, physikalische bzw. biologische Bodeneigenschaften gekoppelt. Veränderungen einer einzelnen Bodeneigenschaft können einen direkten oder indirekten Einfluss auf die Bodenfunktionen haben und sich unterschiedlich stark auswirken. Aus diesem Grund ist die Kenntnis der Beziehungen zwischen den Eigenschaften und den Funktionen eines Bodens eine unabdingbare Voraussetzung für alle Arbeiten zur Erhaltung bzw. Verbesserung der Bodenqualität. Die im Zusammenhang mit der Düngung wichtigen Bodenfunktionen Stoffumsatz und -abbau sowie Biomasseproduktion von Pflanzen werden von den meisten Bodeneigenschaften beeinflusst. Neben den physikalischen Bodeneigenschaften Gefügeaufbau und Gefügestabilität beeinflusst die Menge und Qualität der organischen Substanz im Boden (vereinfacht: Humusgehalt) die meisten Bodenfunktionen. Während die physikalischen Bodeneigenschaften lediglich indirekt durch Düngungsmassnahmen verändert werden können, lässt sich der Humusgehalt durch Düngung auf vielfältige Weise und teilweise sehr direkt beeinflussen. Die organische Substanz im Boden beeinflusst nicht nur die Speicherfähigkeit für Nährstoffe und den Stoffumsatz, sondern stellt selbst einen Pool an Nährstoffen – insbesondere N – dar, der durch Mineralisierung pflanzenverfügbar wird. Die N-Wirkung der organischen Bodensubstanz wird in Tabelle 3 und in den Kulturmodulen auch quantitativ berücksichtigt. Im Folgenden wird auf Faktoren zur Förderung und Erhaltung des Gehaltes an organischer Bodensubstanz fokussiert.

6.3 Langfristige Erhaltung des Humusgehaltes – Entscheidungshilfen und geeignete Massnahmen

6.3.1 Kontrolle des Humusgehaltes über regelmässige Messungen

Für die Beurteilung der Bewirtschaftungswirkungen auf die Veränderung des Humusgehaltes wird im ÖLN auf Ackerflächen eine regelmässige Bestimmung des Humusgehaltes mindestens alle zehn Jahre vorgeschrieben (bei Spezialkulturen gemäss Vorschriften der Organisationen). In den Schweizer Dauerversuchen wurden zwischen den geprüften Bewirtschaftungsverfahren (ohne Berücksichtigung der ungedüngten Kontrollverfahren) relative Veränderungen des Humusgehaltes von bis zu 20 % festgestellt. Mit jährlichen Messungen in Kleinparzellen konnten viele dieser Veränderungen als statistisch signifikant nachgewiesen werden. Wären allerdings nur alle fünf Jahre Messungen gemacht worden, hätten diese Unterschiede meistens auch nach 20 Jahren nicht statistisch signifikant nachgewiesen werden können. Dazu muss auch berücksichtigt werden, dass bei der Untersuchung einer einzelnen Probe, die repräsentativ für eine ganze Praxisparzelle (mit u. U. hoher Bodenvariabilität) entnommen wird, die Nachweisgenauigkeit eher noch verschlechtert wird. Deshalb geben die vorgeschriebenen regelmässigen Messungen zwar einen nützlichen Hinweis für den Landwirt, sind aber nicht ausreichend, um die Wirkung von Bewirtschaftungseffekten auf die Entwicklung des Humusgehaltes von Böden rechtzeitig und zuverlässig erkennen zu können.

6.3.2 Abschätzung des Einflusses der Bewirtschaftung mittels Humusbilanzierung

Mit dem Ziel, unabhängig von Messungen abschätzen zu können, wie sich Fruchtfolgegestaltung und Bewirtschaftungsweise längerfristig auf den Gehalt von Böden an organischer Substanz auswirken werden (Abbildung 16), wurden verschiedenste, unterschiedlich aufwändige Schätzmethoden (Humusbilanzierungsmethoden) entwickelt.

In der Schweiz wurde bereits im Jahre 1997 eine Humusbilanzierungsmethode publiziert (Neyroud *et al.* 1997) und für die Beurteilung der Bodenqualität in Ökobilanzen weiterentwickelt (Oberholzer *et al.* 2006), die nur wenige und leicht verfügbare Informationen zur Bewirtschaftung und zu grundlegenden Bodeneigenschaften benötigt. Bei dieser Methode wird das Ausmass der einzelnen Boden- und

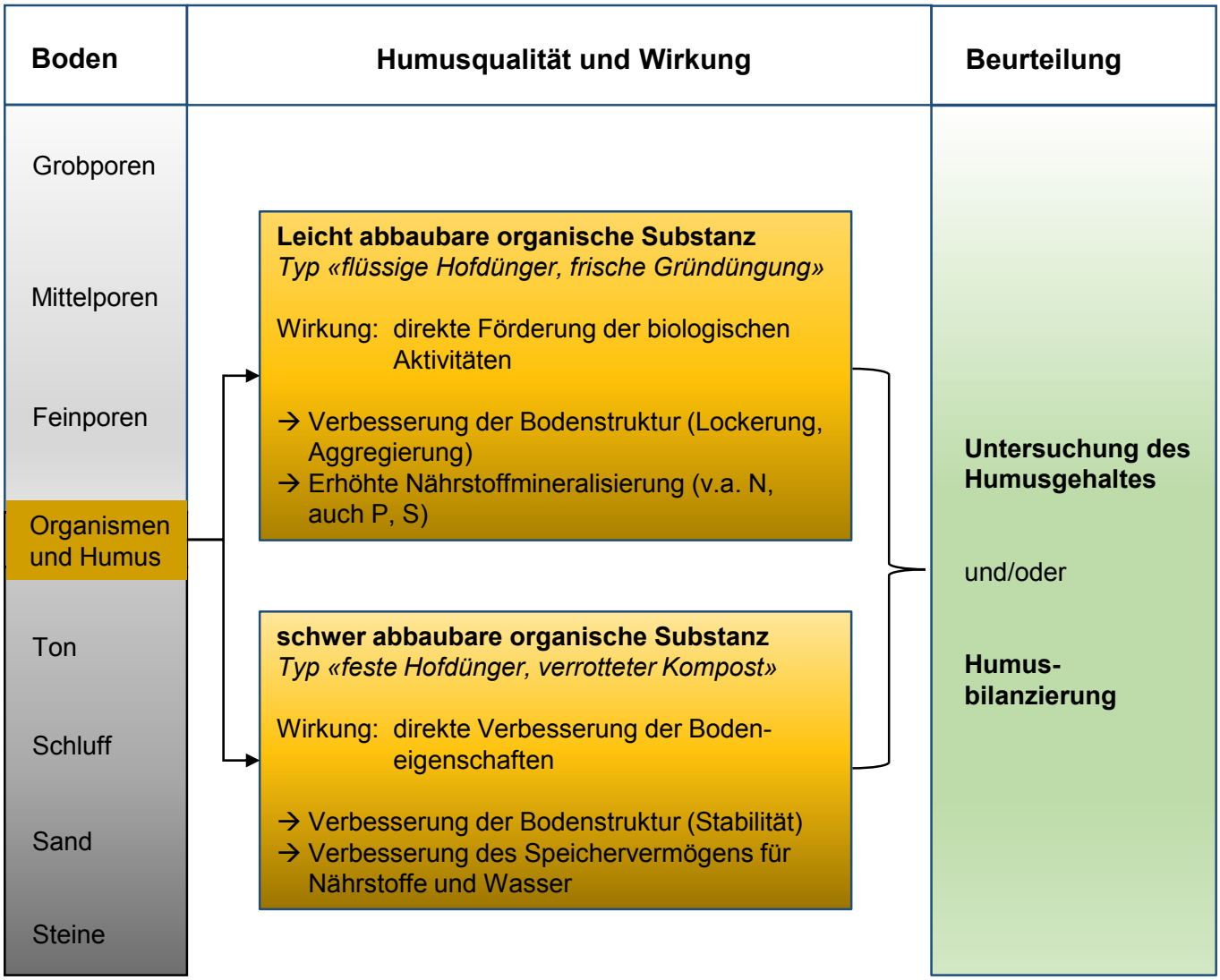

Abbildung 16 | Wirkungen der Zugabe organischer Substanzen auf Humusgehalt und -qualität.

Bewirtschaftungsfaktoren, die zum Humusabbau bzw. zum Humusaufbau beitragen, für jede Parzelle separat abgeschätzt. Damit stellt diese Methode im Prinzip eine Bilanzierung der pro Parzelle zu erwartenden Humusgewinne und -verluste dar. Konkret wird der zu erwartende Humusverlust über die von den Bodeneigenschaften und der Bodenbearbeitungsintensität abhängige Mineralisierungsrate abgeschätzt, die zu erwartenden Humusgewinne über die ober- und unterirdischen Rückstände der angebauten Kulturen sowie die Art und Menge der eingesetzten organischen Dünger ermittelt.

Um die Bewirtschaftung im Hinblick auf die Erhaltung des Humusgehaltes der Böden beurteilen zu können, ist eine regelmässige und vor allem bei Bewirtschaftungsanpassungen wiederholte Berechnung der Humusbilanz des Betriebes zu empfehlen. Falls die geplante Bewirtschaftungsänderung ungünstige Entwicklungen aufzeigt oder die Humusbilanz insgesamt ein negatives Ergebnis aufweist, können mit der Humusbilanzmethode Verbesserungsmassnahmen geprüft und eingeplant werden.

6.3.3 Ergebnisse und Empfehlungen

Für generelle Aussagen zur Humusentwicklung können Ergebnisse von Humusbilanzrechnungen im Rahmen des schweizerischen Agrarumweltmonitorings auf über 300 Betrieben verwendet werden. Sie zeigen grosse und signifikante Unterschiede zwischen den Betriebstypen. Reine Ackerbaubetriebe weisen im Durchschnitt negative Humusbilanzen auf; bei tierhaltenden Ackerbaubetrieben sind sie hingegen durchweg positiv. Verursacht werden negative Humusbilanzen vor allem durch Fruchtfolgen mit hohem Hackfruchtanteil und wenig Kunstwiesen. Das führt einerseits zu einem geringeren unterirdischen Kohlenstoffeintrag durch die Kulturen, andererseits erhöht die intensivere Bodenbearbeitung den Humusabbau (Mineralisierung). Zusätzlich sind die Mengen an zugeführten organischen Düngern auf Ackerbaubetrieben meist geringer, was selbst durch grössere Mengen an oberirdischen Ernteresten (Stroh, Gründüngungen) nicht kompensiert werden kann. Daraus können einige Grundsätze abgeleitet werden:

- Die Erhaltung eines standorttypisch ausreichenden Humusgehaltes, d. h. einer ausreichenden Menge an abgestorbener organischer Substanz, die verschiedene Bodeneigenschaften unmittelbar durch ihre Eigenschaften oder durch die Bildung von organomineralischen Komplexen verbessert, steht meist im Zentrum der Betrachtungen. Mindestens ebenso wichtig ist allerdings auch, dass mit dem Eintrag an organischer Substanz (inkl. den Ausscheidungen der Wurzeln während der Wachstumsperiode der Kulturen) auch die Bodenorganismen mit Energie und Nährstoffen versorgt (gefüttert) werden, damit sie ihre Wirkung entfalten können.
- Bei einer bestimmten Bewirtschaftungsweise wird sich ein für den Standort (d. h. für bestimmte Klima- und Bodeneigenschaften) typischer Humusgehalt einstellen. Er wird bestimmt durch den Humusumsatz, d. h. das Ausmass des Humusabbaus und die Rückführung organischer Substanz durch Dünger und Pflanzenreste in den Boden.
- Durch die auf den Betriebstyp angepasste Fruchtfolge und die Bodeneigenschaften ist die Humusversorgung eines Bodens zu einem grossen Teil bereits bestimmt. Viehhaltende Betriebe haben meistens einen ausreichenden Anteil an Kunstwiese in der Fruchtfolge, und aus der Tierhaltung fallen Hofdünger an.
- Durch die Wahl der Kulturen wird hauptsächlich die Menge und Qualität des organischen Materials, das über Wurzeln und Ernterückstände in den Boden gelangt, vorgegeben. Von den Ackerkulturen tragen neben den Kunstwiesen Körnermais und Sonnenblumen durch die auf dem Feld verbleibenden Stängel und Blätter am meisten zur Zufuhr von organischer Substanz bei, Zuckerrüben und Kartoffeln am wenigsten, da das Kraut sehr leicht abbaubar ist. Getreide, wenn das Stroh geerntet wird, und Raps liegen dazwischen. Grundsätzlich positiv wirken sich Zwischenkulturen auf die Humusversorgung aus.
- Von den Bewirtschaftungsmassnahmen ist die Bodenbearbeitung der wichtigste Einflussfaktor: Durch die Bearbeitung wird der Boden einerseits gelockert, was ein erhöhtes Porenvolumen und eine bessere Durchlüftung zur Folge hat; andererseits werden die organischen Substanzen in den Boden eingemischt, freigesetzt oder umverteilt. Beides zusammen macht die organische Bodensubstanz für die Bodenorganismen leichter zugänglich, so dass sie intensiver abgebaut werden kann. Die Bodenbearbeitungsintensität wird teilweise von der angebauten Kultur vorgegeben: So lassen sich z. B. Kartoffeln nicht anbauen, ohne dass beim Pflanzen und bei der Ernte der Boden intensiv bearbeitet wird.
- Organische Substanz wird dem Boden auch mit Hofdüngern und organischen Recyclingdüngern wie Kompost zugeführt (Abbildung 16). Auch bei diesen bestimmen Zusammensetzung und Qualität darüber, wie viel organische Substanz kurzfristig in pflanzenverfügbare Nährstoffe abgebaut werden kann, bzw. welcher Anteil schwer abbaubar ist und damit länger als organisches Material im Boden verbleibt. Grundsätzlich tragen feste organische Dünger stärker zur Humusbildung bei als flüssige, und bereits verrottete Dünger wie Kompost oder Mistkompost erhöhen den Humusgehalt relativ stärker als frische Dünger.

7. Literatur

Agroscope, 1996. Schweizerische Referenzmethoden der Forschungsanstalten Agroscope, Band 1: Bodenuntersuchungen zur Düngeberatung, Ausgabe 2015. Agroscope, Zürich.

Bertschinger L., Gysi Ch., Häseli A., Neuweiler R., Pfammatter W., Ryser J.-P., Schmid A. & Weibel F., 2003. Grundlagen für die Düngung der Obstkulturen, Flugschrift Nr. 15. Forschungsanstalt Agroscope Changins-Wädenswil FAW, Wädenswil.

BLW, 2012. HODUFLU – Verwaltung der Hofdüngerflüsse. Bundesamt für Landwirtschaft BLW, Bern. Zugang: https://www.agate.ch/portal/web/agate/hofdungerflusse [11.10. 2016].

BGS, 2010. Klassifikation der Böden der Schweiz. 3. Auflage. Bodenkundliche Gesellschaft der Schweiz, Luzern. 86 S.

Candinas T., Neyroud J.-A., Oberholzer H.-R. & Weisskopf P., 2002. Ein Bodenkonzept für die Landwirtschaft in der Schweiz: Grundlagen für die Beurteilung der nachhaltigen landwirtschaftlichen Bodennutzung. Bodenschutz 3/02, 90–98.

Carlen Ch. & Carron C.-A., 2007. Grundlagen für die Düngung der Gewürz- und Medizinalpflanzen. Agrarforschung 14 (1), 1–8.

Collaud G., Ryser J.-P. & Schwarz J.-J., 1990. Capacité d'échange des cations. Revue suisse d'agriculture 22 (5), 285–289.

Demaria P., Flisch R., Frossard E. & Sinaj S., 2005. Exchangeability of phosphate extracted by four chemical methods. Journal of Plant Nutrition and Soil Science 68, 89–93.

Dirks B. & Scheffer H., 1930. Der Kohlensäure-Bikarbonatauszug und der Wasserauszug als Grundlage zur Ermittlung der Phosphorsäurebedürftigkeit der Böden. Landwirtschaftliche Jahrbücher 71, 73–99.

Fabre B. & Kockmann F., 2006. Les effets du chaulage sur les prairies permanentes ou de longue durée. Synthèse bibliographique. Fourrages 185, 103–122.

Flisch R., Sinaj S., Charles R. & Richner W., 2009. Grundlagen für die Düngung im Acker- und Futterbau (GRUDAF). Agrarforschung 16 (2), 1–100.

Frossard E., Julien P., Neyroud J.-A. & Sinaj S., 2004. Phosphor in Böden – Standortbestimmung Schweiz. Schriftenreihe Umwelt Nr. 368. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft BUWAL, Bern. 174 S.

Gysi Ch., Ryser J.-P., Heller W. & Arbeitsgruppe Bodenuntersuchungen in Spezialkulturen, 1993. Flugschrift 129. Eidg. Forschungsanstalt für Obst-, Wein- und Gartenbau, Wädenswil. 18 S.

Gysi Ch., Ryser J.-P. & Heller W., 1997. Bodenuntersuchung im Gemüsebau. Flugschrift Nr. 112, 2. Auflage. Eidg. Forschungsanstalt für Obst-, Wein- und Gartenbau, Wädenswil. 24 S.

Hons F. M., Larson-Vollmer L. A. & Locke M. A., 1990. NH_40Ac-EDTA-extractable phosphorus as a soil test procedure. Soil Science 149 (5), 249–256.

Huguenin-Elie O., Stutz C. J., Gago R. & Lüscher A., 2015. Wirkung der Kalkdüngung auf mit Hahnenfuss verunkrauteten Wiesen. Tagungsband der 59. Jahrestagung der AGGF in Aulendorf, S. 110–113. Hrsg. Landwirtschaftliches Zentrum Baden-Württemberg für Rinderhaltung, Grünlandwirtschaft, Milchwirtschaft, Wild und Fischerei (LAZBW), Aulendorf.

Jeangros B. & Troxler J., 2008. Effet à long terme d'une gestion différenciée sur les prairies et les pâturages d'une exploitation de montagne. Revue suisse d'agriculture 40 (3), 123–130.

Neuweiler R., 2011. Düngungsrichtlinien für den Gemüsebau. Forschungsanstalt Agroscope Changins-Wädenswil ACW, Wädenswil. 29 S.

Neyroud J.-A., Supcik P. & Magnollay F., 1997. La part du sol dans la production intégrée. 1. Gestion de la matiére organique et bilan humique. Revue Suisse Agriculture 29, 45–51.

Oberholzer H.-R., Weisskopf P., Gaillard G., Weiss F. & Freiermuth Knuchel R., 2006. Methode zur Beurteilung der Wirkungen landwirtschaftlicher Bewirtschaftung auf die Bodenqualität in Ökobilanzen. Agroscope, Zürich.

Pellet D., Mercier E., Balestra U., Lavanchy J. C., Pfeifer H. R., Keiser A. & Bezençon N., 2003a. Optimisation de la fumure soufrée par estimation du risque de carence. I. Colza d'automne. Revue suisse d'Agriculture 35, 161–167.

Pellet D., Mercier E. & Balestra U., 2003b. Optimisation de la fumure soufrée par estimation du risque de carence. II. Blé d'automne. Revue suisse d'Agriculture 35 (4), 181–186.

Peyer K., 1970. Phosphatversorgung der Pflanzen und Kennwerte des Bodenphosphats, untersucht an einigen Böden der Schweiz. ETH Diss. Nr. 4501, Zürich. Zugang: http://dx.doi.org/10.3929/ethz-a-000085418 [14.10. 2016].

Ryser J.-P., 1982. Etude du potassium assimilable pour les cultures sur quelques sols du canton de Vaud. ETH Diss. Nr. 7095, Zürich. Zugang: http://dx.doi.org/10.3929/ethz-a-000278617 [14. 10. 2016].

Schroeder D., 1984. Bodenkunde in Stichworten. 4. Auflage. Verlag Ferdinand Hirt, Unterägeri. 160 S.

Schechtner G., 1993. Wirksamkeit der Kalkdüngung auf Grünland. Die Bodenkultur 44 (2), 135–152.

Spring J.-L., Ryser J.-P., Schwarz J.-J., Basler P., Bertschinger L. & Häseli A., 2003. Grundlagen für die Düngung der Reben. AMTRA, Nyon. 24 S.

Stünzi H., 2006a. Die P-Bodenextraktionsmethoden mit Wasser und CO_2-Wasser. Agrarforschung 13 (7), 284–289.

Stünzi H., 2006b. Zur P-Bodenextraktion mit Ammoniumacetat-EDTA (AAE10). Agrarforschung 13 (11–12), 488–493.

VBBo, 1998. Verordnung über Belastungen des Bodens vom 1. Juli 1998. Systematische Sammlung des Bundesrechts der Schweiz, SR 814.12, Bern.

Van der Paauw F., 1956. Calibration of soil test methods for the determination of phosphate and potash status. Plant and Soil 8, 105–125.

Walther U., Ryser J.-P., Flisch R. & Siegenthaler A., 1987. Düngungsrichtlinien für den Acker- und Futterbau. Eidg. Forschungsanstalten FAP, Zürich, FAC, Bern, & RAC, Changins.

Walther U., Ryser J-P. & Flisch R., 2001. Grundlagen für die Düngung im Acker- und Futterbau (GRUDAF). Agrarforschung 8 (6), 1–80.

Zbíral J., 2000. Determination of phosphorus in calcareous soils by Mehlich, CAL and Egner extractants. Communications in Soil Science and Plant Analysis 31 (19/20), 3037–3048.

Zimmermann K. S., 1997. Wirkung einer gepufferten Ammonium-Acetat-EDTA-Extraktion auf ausgewählte Bodenbestandteile und natürliche Bodenproben. ETH Diss Nr. 12134, Zürich. Zugang: http://dx.doi.org/10.3929/ethz-a-001763309 [14. 10. 2016].

8. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 | Beziehung zwischen Tonklassen (Tonanteilen) und Bodeneigenschaften. 2/4

Tabelle 2 | Bodenkundliche Klassifizierung des Humusgehaltes (BGS 2010). 2/4

Tabelle 3 | Agronomische Beurteilung des Humusgehaltes des Bodens zur Abschätzung der potenziellen N-Nachlieferung des Bodens. 2/4

Tabelle 4 | Beurteilung des pH-Wertes (Reaktion) und der Kalkbedürftigkeit des Bodens. 2/5

Tabelle 5 | Empfehlungen zur Entnahme von Bodenproben in den verschiedenen Gruppen von landwirtschaftlichen Kulturen. 2/7

Tabelle 6 | Die wichtigsten Bodenuntersuchungsmethoden von Agroscope im Hinblick auf eine optimale Gestaltung der Düngung. 2/8

Tabelle 7 | Wahl der Untersuchungsmethoden (Grundanalyse) bei verschiedenen Kulturgruppen. 2/9

Tabelle 8 | Allgemeine Beurteilung des Nährstoffzustandes des Bodens aufgrund der in Tabelle 10 bis Tabelle 18 ermittelten Korrekturfaktoren. 2/10

Tabelle 9 | Korrektur der Analysenwerte für Böden mit einem Humusgehalt von mehr als 10 %. 2/11

Tabelle 10 | Korrekturfaktoren der P-Düngung in Abhängigkeit der P-Gehalte (CO_2-Methode) und des Tongehaltes des Bodens. (P-Testzahl 1 = 0,155 mg P/kg Boden). 2/12

Tabelle 11 | Korrekturfaktoren der K-Düngung in Abhängigkeit der K-Gehalte (CO_2-Methode) und des Tongehaltes des Bodens. (K-Testzahl 1 = 8,3 mg K/kg Boden). 2/13

Tabelle 12 | Korrekturfaktoren der Mg-Düngung in Abhängigkeit des Mg-Gehaltes ($CaCl_2$-Methode) und des Tongehaltes des Bodens. (Mg-Testzahl 1 = 10 mg Mg/kg Boden). 2/14

Tabelle 13 | Korrekturfaktoren der P-Düngung in Abhängigkeit der P-Gehaltes (mg P/kg Boden, H_2O10-Methode) und des Tongehaltes des Bodens. 2/14

Tabelle 14 | Korrekturfaktoren der K-Düngung in Abhängigkeit der K-Gehaltes (mg K/kg Boden, H_2O10-Methode) und des Tongehaltes des Bodens. 2/15

Tabelle 15 | Korrekturfaktoren der Mg-Düngung in Abhängigkeit des Mg-Gehaltes (mg Mg/kg Boden, H_2O10-Methode) und des Tongehaltes des Bodens. 2/15

Tabelle 16 | Korrekturfaktoren der P-Düngung in Abhängigkeit der P-Gehalte (mg P/kg Boden, AAE10-Methode) und des Tongehaltes des Bodens für kalkfreie Böden (Kalkvorprobe negativ oder pH < 6,8 oder AAE10-Ca < 4000 mg Ca/kg Boden). 2/17

Tabelle 17 | Korrekturfaktoren der K-Düngung in Abhängigkeit des K-Gehaltes (mg K/kg Boden, AAE10-Methode) und des Tongehaltes des Bodens. 2/18

Tabelle 18 | Korrekturfaktoren der Mg-Düngung in Abhängigkeit des Mg-Gehaltes (mg Mg/kg Boden, AAE10-Methode) und des Tongehaltes des Bodens für kalkfreie Böden (Kalkvorprobe negativ oder pH < 6,8 oder AAE10-Ca < 4000 mg Ca/kg Boden). 2/19

Tabelle 19 | Kriterien zur Beurteilung des S-Angebots des Bodens mit Hilfe einer Punkteskala. 2/22

Tabelle 20 | Korrekturfaktoren der S-Düngung nach S-Angebot des Bodens und S-Entzug der Kulturen. 2/22

Tabelle 21 | Bemessung der B- und Mn-Düngung aufgrund von Bodenuntersuchungs-ergebnissen, der Bodeneigenschaften und der Bedürftigkeit der Kulturen (Analyse-methoden siehe Tabelle 6). 2/24

Tabelle 22 | Grobe Bemessung von Kalkgaben aufgrund des pH-Wertes und des Tongehaltes des Bodens sowie der Bodennutzung. 2/25

Tabelle 23 | Beurteilung des Kalkzustandes des Bodens aufgrund der Basensättigung. 2/26

Tabelle 24 | Bemessung von Kalkgaben aufgrund der Basensättigung und der Kationen-austauschkapazität des Bodens. 2/26

9. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 | Beurteilung des Bodenprofils. 2/3

Abbildung 2 | Schema der Beziehung zwischen pH-Wert und pedogenetischen (bodenbürtigen) und ökologischen Faktoren. 2/5

Abbildung 3 | Vorbereitung der Bodenproben für die Laboranalysen: Sieb mit 2 mm Maschenweite zur Trennung von Skelett und Feinerde. 2/6

Abbildung 4 | Filtration von Boden-Extrakten. 2/10

Abbildung 5 | Bestimmung verschiedener Elemente mittels Flammen-Atomabsorptions-spektrometrie (AAS). 2/10

Abbildung 6 | Langzeit-Versuch (Versuchsbeginn 1989) mit unterschiedlicher P-, K- und Mg-Düngung als Grundlage für die Interpretation von Bodenuntersuchungsresultaten. 2/10

Abbildung 7 | Phosphormangel bei Zuckerrüben. 2/11

Abbildung 8 | Einfluss der Nährstoffversorgung des Bodens auf das Pflanzenwachstum. 2/12

Abbildung 9 | Die K-Versorgung von Chicorée-Wurzeln im Feld ist entscheidend für die Qualität der Chicorée-Zapfen. 2/16

Abbildung 10 | Entwicklung der P-Gehalte (CO_2- und AAE10-Methode) im Boden bei unterschiedlicher P-Düngung (ohne P, Normdüngung, $^5/_3$ der Normdüngung) und Einfluss auf die Kornerträge von Weizen. 2/16

Abbildung 11 | Schema zur Ermittlung des Düngebedarfs an P, K und Mg. 2/20

Abbildung 12 | Phosphormangel bei jungen Maispflanzen. 2/20

Abbildung 13 | Kaliummangel bei Kartoffeln. 2/21

Abbildung 14 | Schwefelmangel bei Kohlrabi. 2/22

Abbildung 15 | Bormangel (z. B. nach zu hohen Kalkgaben) führt bei Zuckerrüben zu Herzfäule. 2/23

Abbildung 16 | Wirkungen der Zugabe organischer Substanzen auf Humusgehalt und -qualität. 2/29