

Grundlagen der Bodenkunde im Hinblick auf Pflanzenernährung und Düngung

Der Boden ist ein heterogenes Medium bestehend aus den drei Phasen fest, flüssig und gasförmig, die alle zur mineralischen Ernährung der Pflanze beitragen. Die feste Phase ist das wesentliche Reservoir für kationische Nährstoffe; organische Bestandteile liefern N und zu geringeren Anteilen P und S. In der flüssigen Phase erfolgt der Transport zur Wurzel. In der flüssigen und gasförmigen Phase verlaufen die interaktiven Prozesse zwischen den zahlreichen lebenden Organismen des Bodens.

3.1. Bodenphysikalische Parameter

3.1.1 Bodenprofil und -tiefe

Die **bodenbildenden Prozesse** Verwitterung, Mineralbildung, Zersetzung der organischen Substanz und Humifizierung, Gefügebildung und Stoffumlagerungen führen zur Gliederung des Bodens in Horizonte. Auch die Konzentrationen der Nährstoffe variieren entlang des **Bodenprofils**. Durch Düngung zugeführte Nährstoffe werden in den Bearbeitungshorizont eingebracht und entsprechend ihrer Mobilität und dem aktuellen Wasserhaushalt weniger oder mehr in untere Bodenschichten verlagert. Die auf einen raschen Gasaustausch angewiesene Mineralisierung der organischen Substanz liefert die mineralischen Nährstoffe ebenfalls primär in den oberen Bodenhorizont. Die **Mächtigkeit des "nährstoffreichen" A-Horizontes, Nährstoffgehalt im Unterboden** und die **Bodentiefe** bestimmen das Bodenvolumen, welches den Pflanzenwurzeln zur Wasser- und Nährstoffaufnahme zur Verfügung steht.

3.1.2 Körnung (Textur)

Die Feststoffe im Boden sind Gemische aus Mineralkörnern, Gesteinsbruchstücken und Humuspartikeln. Man unterscheidet entsprechend dem Radius verschiedene **Korngrößen** (Abb. 3.1). Die Korngrößenverteilung erlaubt eine Klassifikation der Bodenart im Bodendreieck (Abb. 3.2). Die Korngrößenverteilung und die Bestimmung der Bodenart kann auf dem Feld anhand der **Finger- oder Fühlprobe** oder aber über eine Korngrößenanalyse (Siebungen und Sedimentationsverhalten) im Labor ermittelt werden. Die Körnung beeinflusst ertragsbestimmende Faktoren **des Luft- und Wasserhaushaltes** über die **Porenverteilung**, entweder direkt z.B. bei Sanden, bei höheren Anteilen Schluff und Ton mittelbar in Abhängigkeit von der vorliegenden **Gefügeform**. Weitere Effekte der Körnung auf die Ernährung der Pflanze mit mineralischen Nährstoffen ergeben sich aus der unterschiedlichen mineralischen Zusammensetzung, den entsprechenden Verwitterungsprodukten, den Nährstoffreserven und dem Sorptionsvermögen der Bodenminerale. Die

spezifische Oberfläche, abhängig von Korngröße und innerhalb der Tonfraktion auch von der mineralischen Zusammensetzung, ist eine wesentliche Determinante des Sorptionsverhaltens (Tab. 3.1).

3.1.3 Gefüge (Struktur)

Außer bei Sandböden mit geringer Aggregatbildung (**Einzelkorngefüge**) bestimmt nicht die Größe der Bodenpartikel die Porenverteilung im Boden sondern die Größe der **Aggregate** sowie deren Stabilität. Durch Aggregation verbessern sich **Wasserspeicherung** und **Durchlüftung** gleichermaßen und werden nah beieinander liegende Lebensräume geschaffen: sowohl für lufthungrige Mikroben an den Aggregatoberflächen als auch luftscheue Mikroben im Innern der Aggregate.

Wassergehalt und Wasserbindung

Das Wasser im Boden ist nur zum Teil frei beweglich, ein je nach Bodenart und Wassergehalt variierender Anteil wird mit unterschiedlicher Intensität von der Bodenmatrix gebunden und als **Adsorptions-** bzw. **Kapillarwasser** gegen die Gravitationskraft gehalten. Die Bindungsintensität wird sowohl im Boden als auch in der Pflanze als **Wasserpotential** ausgedrückt. Unter dem Begriff Potential versteht man die Arbeit oder Energie, die erforderlich ist um eine Einheit Wasser von einem gegebenen Punkt gegen ein Kraftfeld zu einem Bezugspunkt zu heben.

Das Gesamtpotential setzt sich zusammen aus der Summe der durch verschiedene Kräfte erzeugten Teilpotentiale. Für den Boden ist das **Matrixpotential** (früher auch Kapillarpotential) die wesentliche Komponente des Gesamtpotentials. Die Bindungsintensität des Wassers in einer Kapillare hängt ab von dem Durchmesser der Pore und kann aus der Beziehung zwischen Oberflächenspannung und Höhe der Kapillarsäule abgeleitet werden. Entsprechend kann für jede Porengröße eine Saugspannung (oder Matrixpotential), berechnet werden, welche überschritten werden muss um die Pore zu entleeren (Tab. 3.2). Die Beziehung zwischen Wassergehalt und Matrixpotential eines Bodens kann von der Porenverteilung abgeleitet werden und wird in Form der **Desorptionskurve** beschrieben (Abb. 3.3).

Die Porenverteilung ist weiterhin entscheidend für die Durchwurzelbarkeit eines Bodens, da Wurzelhaare in Poren von 10 - 50 µm Durchmesser eindringen können, Mittelporen (< 10 µm) jedoch in der Regel erst durch Aufweitung erschlossen werden können.

Beeinflussbarkeit der bodenphysikalischen Parameter durch Düngung

Die Körnung eines Bodens lässt sich durch Düngungsmaßnahmen nicht verändern, allerdings kann durch organische und anorganische Düngung das Gefüge bzw. die **Krümelstruktur** und damit der Gas- und Wärmeaustausch im Boden gefördert werden.

Insbesondere für ton- und schluffreiche Böden ist der Aufbau von Aggregaten aus den Primärteilchen von Bedeutung. Auch in Sandböden kann durch eine Erhöhung des Humusgehaltes ein verbessertes Wasserhaltevermögen auf Grund der hohen Wasserkapazität erreicht werden (Humus kann ein vielfaches seines Eigengewichtes an Wasser halten). Allerdings ist die Erhöhung des Humusgehaltes auch bei starker organischer Düngung nur gering. Starke Stallmistgaben auf schluffigem Sandboden ergaben in 18 Jahren eine Zunahme des Humusgehaltes von 0.93 auf 1.38 % und eine Zunahme des Porenvolumens von 38.4 auf 41.4 %. Das Gefüge, und damit über verbesserten Luft- und Wasserhaushalt auch die Ertragsfähigkeit des Bodens, kann aber durch eine höhere **Aggregatstabilität** deutlich verbessert werden (Tab. 3.3).

3.2. Bodenchemische Parameter

3.2.1 Bodenreaktion

Die Bodenreaktion beschreibt die saure oder basische Reaktion der Bodenlösung und gilt als wichtiger Parameter zur Beurteilung der pflanzenbaulichen Eignung und Fruchtbarkeit. Die große Bedeutung der Bodenreaktion ergibt sich aus ihrer Wirkung auf zahlreiche biologische und chemische Prozesse und entsprechende Abhängigkeit der Verfügbarkeit einzelner Nährstoffe vom pH-Wert des Bodens.

Der pH-Wert

Der pH-Wert ist ein Maß für die Bodenreaktion (den Kalkzustand), d.h. er zeigt an, ob der Boden sauer, neutral oder alkalisch "reagiert". Der pH-Wert (potentia hydrogenii, Potenz des Wasserstoffs) gibt als negativer logarithmischer Wert die H^+ -Konzentration bzw. -Aktivität an, die in val H^+ pro Liter (bzw. g H^+/l) gemessen wird. Der Neutralpunkt von pH 7 resultiert aus dem Ionenprodukt des reinen Wassers, das eine H^+ -Konzentration von 10^{-7} val/l hat (der negative Logarithmus beträgt also 7).

Messung des pH-Wertes

Die Messung des pH-Wertes erfolgt entweder mittels speziellen pH-Elektroden oder aber mit Farbindikatoren (Näherungswert) in einer Bodensuspension. Lufttrockene Bodenproben werden in der Regel im Verhältnis 1:2.5 mit einem Suspendierungsmittel versetzt. Als Suspendierungsmittel werden Wasser, 0.1 M KCl oder 0.01 M $CaCl_2$ (Deutschland) verwendet. Die pH-Werte in Wasser liegen etwa 0.5-1 pH-Stufen höher als pH-Werte in Salzlösung. Die adäquate Wahl der Methode richtet sich nach der vorherrschenden Bodenlösung (gemäßigt-humide Regionen: Salzlösung, stark verwitterte und saure Böden der Tropen mit geringem Salz- und Ca-Gehalt: Wasser). Die richtige Kalkmenge lässt sich (unter Einbeziehung der potentiellen Acidität) aus dem pH-Wert des Bodens und dem pH-Ziel (der anzustrebenden Bodenreaktion) ableiten.

Kalkbedarf

Der pH-Wert der meisten Böden ist zu niedrig, deshalb wird im allgemeinen versucht mit einer Kalkung diesen Wert auf ein Optimum anzuheben. Die gezielte pH-Senkung (Versauerung) durch Düngung spielt nur gelegentlich eine Rolle.

Zweck der Kalkung ist vor allem die Neutralisation von Säure (H^+ -Ionen), d.h. eine Erhöhung des pH-Wertes, die letztlich nur mit Hydroxiden (Basen, Laugen, also mit OH^- -Ionen) erfolgen kann. Da technische Alkalilaugen (Kalilauge, Natronlauge) aus preislichen und sonstigen Gründen für die Düngung ausscheiden, werden Erdalkalilaugen (Hydroxide von Calcium und Magnesium) verwendet bzw. Stoffe, die bei ihrer Umsetzung im Boden diese Basen ergeben.

Optimale Bodenreaktion

Die optimale Einstellung der Bodenreaktion (des Kalkzustandes) ist um so wichtiger, je höher das Produktionsniveau liegt. Der richtige pH-Wert bildet die Voraussetzung für die effektive Nutzung der Dünger- und Bodennährstoffe. Die Pflanzen sind in einem relativ weiten Bereich der Bodenreaktion tolerant. Die Bedeutung der Bodenreaktion liegt jedoch vor allem darin, dass sie

- die Nährstoffverfügbarkeit und
- die Mobilität gewisser Schadstoffe reguliert bzw. anzeigt und
- ein Maß für strukturbildende Faktoren und die Aktivität des Bodenlebens darstellt.

Der für das Pflanzenwachstum optimale pH-Wert ist nicht der Neutralwert (6.5-7.5), sondern wird aus Beziehungen zwischen Ertrag und pH-Wert abgeleitet. Der pH soll in einem Bereich liegen wo eine Al-Toxizität vermieden wird, die Verfügbarkeit der Mikronährstoffe Mn, Cu, Zn und B aber nicht zu stark eingeschränkt ist. Die Empfehlung eines optimalen pH-Wertes stützt sich in Deutschland im wesentlichen auf die Ton- und Humusgehalte sowie die angebaute Kulturpflanze ab. In tonarmen Böden (< 5 %) wird meist ein $pH(CaCl_2)$ von 5.5 empfohlen, aufgrund der Gefüge verbessernden Wirkung steigt der optimale pH mit steigendem Tongehalt (Tab. 3.4). Auch die Kulturarten weisen unterschiedliche pH Werte für optimalen Ertrag auf, was bei der Planung des Zeitpunktes der Kalkung innerhalb der Fruchtfolge berücksichtigt werden sollte:

Säureliebende bzw. kalkempfindliche Pflanzen (z.B. Hafer, Roggen, Kartoffeln, Rotklee, Weißklee).

Kalkliebende bzw. säureempfindliche Pflanzen (z.B. Gerste, Weizen, Zuckerrüben).

Notwendige Kalkmenge

Die Kalkmenge wird zunächst in "CaO" angegeben, wobei die richtige Kalkform entsprechend dem jeweiligen Zweck gewählt werden sollte. Die Mengen beziehen sich auf

das Bodenvolumen des Oberbodens von 0-20 cm Tiefe. Bei tieferer Bodenkrume sind entsprechende Zuschläge erforderlich, z.B.

- für 0-25 cm Oberboden = Zuschlag von 25 %
- für 0-30 cm Oberboden = Zuschlag von 50 %.

Die verabreichte Kalkmenge muss durch entsprechende Bodenbearbeitung in das jeweilige Bodenvolumen eingemischt werden. Folgende Höchstmengen sollten als einmalige Gaben nicht überschritten werden:

- für leichte Böden: 20 dt kohlensaurer Kalk (CaCO_3)
- für mittlere und schwere Böden: 30-50 dt Branntkalk (CaO) (für Grünland maximal 20 dt).

Falls aus irgendwelchen Gründen eine Kalkbedarfsbestimmung nicht möglich ist, so kann zur Erhaltungskalkung mit einem mittleren Bedarf von etwa 10-20 dt/ha CaCO_3 für einen Zeitraum von drei Jahren gerechnet werden. Dies ist jedoch ein sehr roher Schätzwert. Allein aus der Kenntnis des pH-Wertes kann nur eine ungefähre Kalkungsempfehlung abgeleitet werden:

- für Bodenart Sand: bei pH 5 etwa 5 dt/ CaO (9 dt CaCO_3)
- für die Bodenarten lehmiger Sand bzw. sandiger Lehm: bei pH 5.5 etwa 10 dt, bei pH 5 etwa 20 dt/ha CaO .

Kalkdünger

Kalkdünger sind durch Vermahlung oder chemische Umwandlung aus natürlichen Carbonaten hergestellte oder bei industriellen Prozessen anfallende, basisch wirksame Stoffe, die vor allem der Erhöhung der Bodenreaktion dienen. Ihr Nährstoffgehalt an Calcium, Magnesium ist erst in zweiter Linie von Bedeutung.

Als basisch wirksame Stoffe von Kalk-Düngern werden verwendet:

- Ca(OH)_2 bzw. Mg(OH)_2 : direkt wirksam im wässrigen Medium
- CaO bzw. MgO : mit H_2O Umsetzung zu Ca(OH)_2 bzw. Mg(OH)_2
- CaCO_3 bzw. MgCO_3 : z.B. mit CO_2 und H_2O Umsetzung über $\text{Ca(HCO}_3)_2$ zu Ca(OH)_2 und CO_2
- Ca-Silikat bzw. Mg-Silikat: Hydrolyse zu Ca(OH)_2 bzw. Mg(OH)_2

Herkunft und Vorräte

Ausgangsmaterial für Kalkdünger sind Ablagerungen von Kalkgesteinen (chemische Ausfällungen von Ca und Mg im Meerwasser, jedoch überwiegend als kalkhaltige Gehäuse oder sonstige Teile kleiner tierischer und pflanzlicher Lebewesen angesammelt. Je nach Druck und Temperatur entstehen aus dem Kalkschlamm feste harte oder lockere weiche Kalkgesteine. Kalkhaltige Substrate mit höherem Anteil an Silikaten werden auch als Mergel

abgebaut. Die Vorräte sind sehr groß. Regional können allerdings Probleme auftreten (humide Tropen).

Kalkdünger umfassen

- Naturkalke (CaCO_3 u.a.)
 - Mergel (kalkhaltiges Bodenmaterial)
 - Kalkstein (gemahlen)
 - Kalkhaltiges Pflanzenmaterial (z.B. Algenkalk)
- Chemisch aufbereitete Naturkalke
 - Brannkalk, Löschkalk, Mischprodukte
- Industriekalke (Hüttenkalk, Konverterkalk, Rückstandkalke)
- Sonstige Kalkdünger (z.B. mit Phosphat, organ. Substanz)
- Sonstige Dünger mit basischer Wirkung (z.B. P-Dünger mit CaO)

Bewertung der Kalkdünger (Löslichkeit, Reaktivität und Bezugsbasis CaO)

Der Gehalt an basisch wirksamen Stoffen und damit die pH-erhöhende Wirkung der unterschiedlichen Kalkdünger wird anhand der **Bezugsbasis CaO** bewertet, die rechnerisch als Summe aus CaO und MgO ermittelt wird.

Der gesamte Gehalt an basisch wirksamen Stoffen ist nur dann ein brauchbarer Index für die Kalkwirkung, wenn die Umsetzung in Wochen oder Monaten, aber nicht erst nach Jahren erfolgt. Für Carbonatdünger wird daher neuerdings eine gewisse Mindestgeschwindigkeit der Wirkung gefordert. Sie basiert auf der im Labortest ermittelten **Reaktivität** (%-Anteil des Kalkdüngers, der sich in 0.01 N HCl nach 10 Min. löst). Die Reaktivität ist somit ein Maß für die zu erwartende Umsetzung der Kalkdünger im Boden. Dünger mit hohem reaktivem Anteil (> 80 %) dürfen als "leicht umsetzbar" bezeichnet werden. Kohlensaure Kalke und Magnesiumkalke müssen wegen ihrer geringen Wasserlöslichkeit fein vermahlen werden, damit sie als Dünger im Boden zur Wirkung kommen. Heute gilt folgende Regelung mit Berücksichtigung der Reaktivität, um eine ausreichende Wirkungsgeschwindigkeit zu garantieren:

- einheitliche Mindest-Mahlfeinheit für kohlensaure Kalke (97 % < 3 mm; 70 % < 1 mm)
- Reaktivität: mindestens 30 % bei CaCO_3 , mindestens 10 % bei mehr als 25 % MgCO_3 .

Neben der Kalkwirkung ist der **Gehalt an Magnesium** ein wesentliches Qualitätskriterium. Bei Gehalten von über 15 % MgCO_3 handelt es sich um Magnesiumkalke, bei 5-15 % um "Kalke mit Magnesium". Tab. 3.5 zeigt eine Zusammenstellung der wichtigsten Kalkdünger.

Anwendung der Kalkdünger

Die Auswirkungen einer Kalkung sind vielfältiger Art. Richtige Kalkdüngung erfordert daher die Auswahl des richtigen Kalkdüngers, die Anwendung der richtigen Kalkmenge und die sachgemäße Ausbringung.

Die richtige Kalkform

Ein wichtiges Kriterium ist die Wirkungsgeschwindigkeit der Kalke. **Schnell wirkende Kalke** und gut geeignet für die Anwendung auf mittleren und schweren Böden sind Branntkalk und Löschkalk. Auch einige Kreidekalke entfalten eine zügige Wirkung. **Langsam wirkende Kalke** sind kohlenaurer Kalk, Hüttenkalk und Konverterkalk. Sie müssen im Boden erst umgesetzt werden. Die langsame Wirkung ist auf leichten Böden ein großer Vorteil, da infolge der mangelnden Pufferkraft dieser Böden eine Gefahr der Überkalkung besteht.

Die richtige Ausbringung der Kalke

Eine flächenmäßige, gute Kalkverteilung als auch eine gute Einmischung des Kalks in die zu kalkende Bodenlage, d.h. meistens in den Oberboden ist anzustreben. Zweckmäßig erscheint die Kalkung des unbewachsenen Bodens (nach der Ernte) vor stärkerer Bodenbearbeitung. Andere Zeitpunkte sind auch möglich. Kalkung der Kartoffeln längere Zeit vor dem Pflanzen kann ungünstig sein, da der Schorfbefall infolge schlechterer Manganversorgung steigen kann. In solchen Fällen bietet sich eine Kopfdüngung an. Um Ättschäden gering zu halten, sollte entweder Löschkalk oder kohlenaurer Kalk verwendet werden und die Ausbringung möglichst bei trockenem Wetter erfolgen.

Die zeitliche Verteilung der Kalkung

Da nicht in jedem Jahr gekalkt werden muss, bietet sich die Kalkung in bestimmten Stadien der Fruchtfolge besonders an, z.B.:

- Kalkung zu Pflanzen mit Vorliebe für höhere pH-Werte, z.B. zu Zuckerrüben, Raps
- Kalkung zu Kartoffeln, da bei dieser Hackfrucht eine gute Vermischung mit dem Boden erfolgt
- vor stärkerer Bodenbearbeitung, z.B. nach Grünlandumbruch

3.2.2 Organische Substanz

Zur organischen Substanz des Bodens gehören alle in und auf dem Mineralboden befindlichen, abgestorbenen pflanzlichen und tierischen Stoffe, sowie deren Umwandlungsprodukte (inkl. vom Menschen eingebrachte: organische Abfälle, Pestizide). Unterschieden wird dabei zwischen **Streustoffen** (nicht oder nur schwach umgewandelte organische Substanz) und **Huminstoffen** (stark umgewandelte, hochmolekulare Substanzen ohne erkennbare Gewebestruktur). Die organische Ausgangssubstanz wird im Boden über

Zwischenprodukte in anorganische Produkte (**Mineralisierung**) und in Huminstoffe (**Humifizierung**) umgewandelt. Der Abbauprozess kann in verschiedene Phasen unterteilt werden. Die Abbaugeschwindigkeit der organischen Substanz und die Art der Umsetzungsprodukte hängt von der Zusammensetzung der ursprünglichen organischen Substanz (Pflanzenart und -alter, Gehalt an Hemmstoffen) und den Lebensbedingungen der Mikroorganismen (Temperatur, Wasser-, Luft- und Nährstoffhaushalt des Bodens) ab. Anorganische Endprodukte entstehen primär aus den in der organischen Substanz enthaltenen Mineralsalzen, leicht zersetzbaren Kohlenhydraten und N-haltigen Verbindungen; Huminstoffe aus schwer zersetzbaren Kohlenhydraten, Fetten, Wachsen, Gerbstoffen etc.

Als entscheidende chemische Parameter lassen sich in erster Linie **N-Gehalt** und **C/N Verhältnis** finden. Am **C/N Verhältnis** lässt sich prognostizieren, ob bei der Zufuhr von organischem Material eine vorübergehende **N-Sperre** zu erwarten ist, als Folge der Bindung in mikrobieller Biomasse (**Immobilisierung**, $C/N > 25$), oder aber mineralisches N freigesetzt wird ($C/N < 25$). Die Huminstoffe weisen eine sehr hohe Stabilität im Boden auf. Sie sind durch komplexe Bindungsarten in sich und über Metallionen an ihrer Oberfläche mit Tonmineralen verbunden.

Günstige Wirkungen der Huminstoffe im Boden

- Organische **Bindung, Sorption** und **Komplexbildung** von Pflanzennährstoffen.
- Langsame und **nachhaltige Freisetzung** von sorbierten und gebundenen Pflanzennährstoffen als auch durch Mineralisation von Huminstoffen.
- Durch **Aggregatbildung** (Ton-Humus-Komplexen) Bildung und Erhalt einer günstigen Bodenstruktur (Luft- und Wasserhaushalt, Erosionsschutz).
- Erhöhung des **Wasserhaltevermögens**, dadurch wird rasches Austrocknen und Schrumpfen von Böden vermieden (v. a. von Bedeutung für leichte Böden und trockene Gebiete).
- Vermehrung der **Filter- und Pufferwirkung**. Huminstoffe haben sowohl im sauren wie auch im alkalischen Milieu eine hohe Pufferwirkung und wirken daher stabilisierend auf den pH-Wert.
- Immobilisierung und Sorption organischer und anorganischer **toxischer Substanzen**. Dadurch wird sowohl die aktuelle Schadwirkung im Boden als auch die Auswaschung ins Grundwasser verhindert bzw. hinausgezögert.
- Erhöhung der **Bodentemperatur** durch Dunkelfärbung des Bodenkörpers.

3.2.3 Sorptionseigenschaften

Kationenadsorption

Sowohl die Oberflächen von Ton- als auch von Humusteilchen besitzen negativ geladene Oberflächen, die aus dem isomorphen Ersatz von vier- bzw. dreiwertigen Zentralionen (Si^{4+} , Al^{3+}) in den Kristallstrukturen der Tone durch weniger wertige Ionen (Al^{3+} , Mg^{2+}) oder aber durch Dissoziation von H^+ von organischen Säuren resultieren. An diesen Oberflächen werden **Kationen elektrostatisch adsorbiert** und unterliegen **reversiblen**

Austauschprozessen mit Kationen aus der freien Bodenlösung.

Auch die Position am Austauschermineral bestimmt die Austauschbarkeit der adsorbierten Kationen (Abb. 3.4). Die Summe der austauschbaren Kationen wird als **Kationenaustauschkapazität** (mval/kg) bezeichnet. Die Kationenaustauschkapazität von einigen Mineralien, Huminstoffen und einigen Bodentypen ist in Tab.3.6 zusammengestellt.

3.2.4 Nährstoffgehalt und -zusammensetzung

Der überwiegende Teil der Bodennährstoffe ist nativ, das heißt er stammt aus den Ausgangsgesteinen. In Kulturböden erfolgt eine wesentliche **Nährstoffzufuhr** über die Düngung, aber auch über Niederschläge. Eine Zufuhr leicht löslicher Salze kann auch über das Grundwasser und kapillaren Aufstieg erfolgen. Der **Nährstoffentzug** ist im wesentlichen abhängig von Kulturart und -sorte, Ertrag und den der Nutzung entsprechenden Ernterückständen. Weitere Verlustquellen sind Auswaschung (v.a. leicht lösliche Nährstoffe), Bodenerosion, und gasförmige Verluste.

Die Nährstoffe liegen im Boden in verschiedensten Formen vor:

- Salze
- adsorbiert an der Oberfläche von anorganischen und organischen Austauschern
- in schwer austauschbarer Form in Zwischenschichten von Tonmineralen
- in der organischen Substanz, bei Schwermetallen häufig als Komplexe
- in der Biomasse
- immobil als Gitterbaustein in Silicaten und okkludiert im Innern von Eisen- und Manganoxiden.

Die letztlich für die Pflanze wirksame Größe ist aber weniger der Nährstoffgehalt, als die für die Pflanze **verfügbare Menge an Nährstoffen**. Dies ist eine komplexe Größe, abhängig von

- Nährstoffkonzentration in der Bodenlösung
- Nährstoffvorrat im Wurzelraum
- Nährstoffnachlieferung und -transport

Bestimmung der Nährstoffversorgung im Boden kann über

- Feldversuche (Vergleich der Nährstoffgehalte von Böden gleicher Bodenart),
- Gefäßversuche (z. B. "Neubauer-Keimpflanzen-Methode": Vergleich chemischer Extraktionsmethoden),
- Diagnose von Mangelsymptomen an den Pflanzen,
- Pflanzenanalysen,
- mikrobielle Methoden und
- chemische Bodenuntersuchungen erfolgen.

Für die Bemessung der Düngung sind im wesentlichen die Diagnose von Mangelsymptomen, die Pflanzen- und Bodenanalyse relevant. Mangelsymptome sind in der Regel erst bei relativ starker Unterversorgung ausgeprägt und häufig nicht genügend charakteristisch. Die Interpretation der Ergebnisse einer Pflanzenanalyse erfordert eine genaue Definition des Wachstumsstadiums und der zu analysierenden Pflanzenteile, da der Nährstoffgehalt zu unterschiedlichen Wachstumsstadien und in unterschiedlichen Pflanzenorganen sehr variabel ist. Für verschiedene Kulturen wurden mittlerweile optimale Nährstoffgehalte erarbeitet. Die Pflanzenanalyse ist als Methode zur Bemessung einer Düngungsmaßnahme während der Kulturperiode in der Regel zu zeitaufwendig; jedoch wurden zum Teil (v.a. für Stickstoff) Schnelltests entwickelt, die eine Erfassung des Versorgungsgrades zu einem frühen Zeitpunkt ermöglichen und eine Anpassung der Düngung erlauben sollen.

Der Vorteil der **chemischen Bodenuntersuchungsmethoden** besteht darin, dass der Versorgungszustand des Bodens vor Beginn der Vegetationsperiode erfasst wird. In Kenntnis der **Nährstoffdynamik** kann eine entsprechende Düngungsempfehlung ausgesprochen werden. Zu dieser Eichung der Bodenversorgungsstufen im Hinblick auf die Pflanzenverfügbarkeit und Ertragswirksamkeit sind langjährige Feldversuche erforderlich.

Verschiedene Extraktionsverfahren stehen zur Verfügung. Extraktionsverfahren, die in Standardbodenuntersuchungsprogrammen zur Anwendung gelangen sind in Tab. 3.7 aufgelistet. Zur Bestimmung des Nährstoffvorrates im Wurzelraum muss die Lagerungsdichte des Bodens bekannt sein bzw. geschätzt werden, da der Boden in einem gewichtsbezogenen Verhältnis extrahiert wird. Das Extraktionsmittel hat die Aufgabe die Bedingungen der Bodenlösung (Salzgehalt, pH-Wert) zu simulieren. Je nach Bodenart resultieren unterschiedliche Ergebnisse bei der Anwendung verschiedener Extraktionsmittel (Tab. 3.8).

Die Unterschiede in der Einschätzung der P-Versorgung mit den unterschiedlichen Extraktionsmitteln sind im allgemeinen größer als für die Einschätzung der K-Versorgung.

Die erhaltenen Werte der Bodenuntersuchung, führen unter Berücksichtigung von Bodenfaktoren zur Einteilung in Gehaltsklassen; unter Berücksichtigung weiterer

Standortfaktoren zur Einteilung in Versorgungsstufen des Bodens. Die Berechnung der mineralischen Düngung erfolgt dann entsprechend der Kulturart, dem Ertragsniveau und - im Fall der Hofdüngeranwendung - der anrechenbaren Nährstofflieferung aus einer organischen Düngung (Abb. 3.6). Die Beziehung zwischen Gehalts- und Versorgungsstufen zur erforderlichen Düngung und zum Ertrag wird empirisch abgeleitet.

Beispiel Phosphor

Die entscheidenden Grundlagen für den genannten Zusammenhang zwischen Bodenuntersuchung und Düngung sind exakt durchgeführte Feldversuche. Erst deren Ergebnisse erlauben eine Eichung der Gehaltsklassen.

Definition der Gehaltsklasse C:

Die Nährstoffgehaltsklasse C entspricht der **optimalen** Nährstoffversorgung des Bodens. Die hier empfehlenswerte Düngung erfüllt zwei Bedingungen: Sie ist **ökonomisch optimal** und gleichzeitig so zu bemessen, dass die **Gehaltsklasse C erhalten bleibt** (Erhaltungsdüngung). Zwischen Düngung und Nährstoffgehalt herrscht ein stabiler Gleichgewichtszustand. Die Düngung erfolgt im Mittel über die Fruchtfolge nach der P-Abfuhr. Eine Düngung dient vorrangig der Absicherung von Ertragssicherheit, Pflanzengesundheit (Vitalität/Resistenz), Produktequalität sowie der Erhaltung des Nährstoffgehaltes im Boden (Bodenfruchtbarkeit).

Bei P-Gehalten von **> 20 mg P_2O_5 /100 g Boden** (CAL-Methode) ist durch P-Düngung eine Ertragsbeeinflussung weitgehend auszuschließen. Nur in wenigen Versuchen wurden ausreichende Mehrerträge erzielt. Im Gehaltsbereich **10-20 mg P_2O_5 /100 g Boden** werden durch P-Düngung ökonomisch relevante Mehrerträge erreicht. Bei **P_2O_5 -Gehalten <10 mg/100 g Boden** wurden in beinahe allen Versuchen mehr oder weniger hohe Mehrerträge erreicht.

Für die gefundenen, geringfügigen Mehrerträge im Bereich von 10-20 mg P_2O_5 /100 g Boden waren P-Düngemengen etwa in Höhe des P-Entzuges bzw. der P-Abfuhr der Pflanzen ausreichend. Höhere P-Düngung führte zu keinem weiteren Ertragsanstieg. Dagegen erwiesen sich höhere P-Düngemengen (z.T. erheblich über dem P-Entzug) als erforderlich für die hohen Mehrerträge bei P-Gehalten <10 mg P_2O_5 /100 g Boden.

Unter Berücksichtigung der für die P-Gehaltsbestimmung im Boden verwendeten DL- und CAL-Methode lässt sich somit für die Gehaltsklasse C ein einheitlicher P-Gehaltsbereich von etwa 10-20 mg P_2O_5 /100 g Boden (CAL- bzw. DL-Methode) ableiten (Tab.3.9). Die gleichen P-Gehaltsbereiche sollten für das Grünland zutreffen. Für die Festlegung auch einheitlicher P-Gehalte für P-Gehaltsklasse A bzw. B ist eine Halbierung der P-Gehaltsspanne <10 mg P_2O_5 /100 g Boden ein gerechtfertigtes Vorgehen.

Abbildungen und Tabellen zu Kapitel 3: Grundlagen der Bodenkunde im Hinblick auf Pflanzenernährung und Düngung

Abbildung 3.1 Korngrößenklassifikation nach amerikanischem und deutschem System.

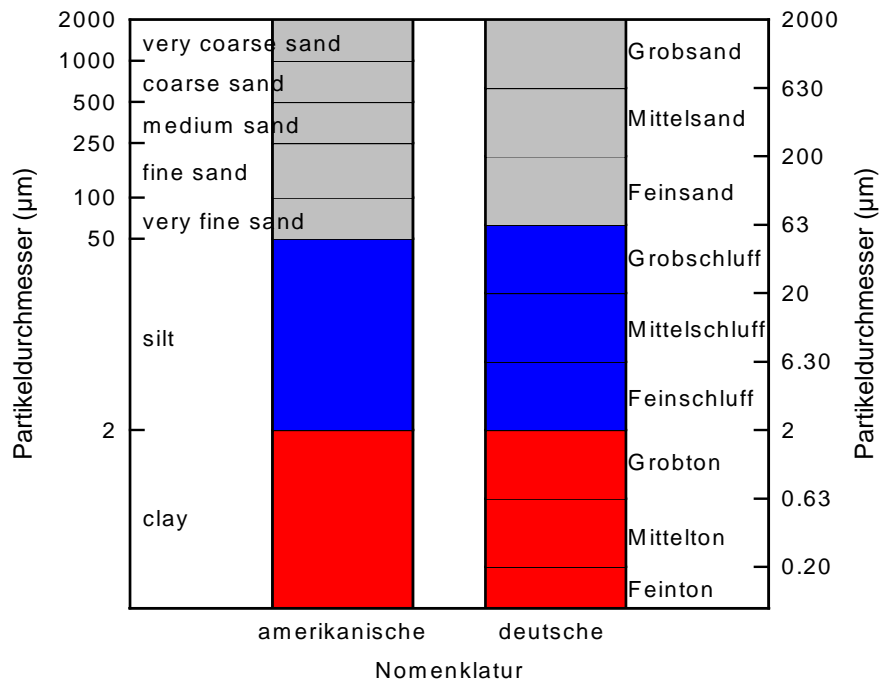


Abbildung 3.2 Bodenarten des Feinbodens im Dreieckskoordinatensystem (Scheffer Schachtschabel 1992)

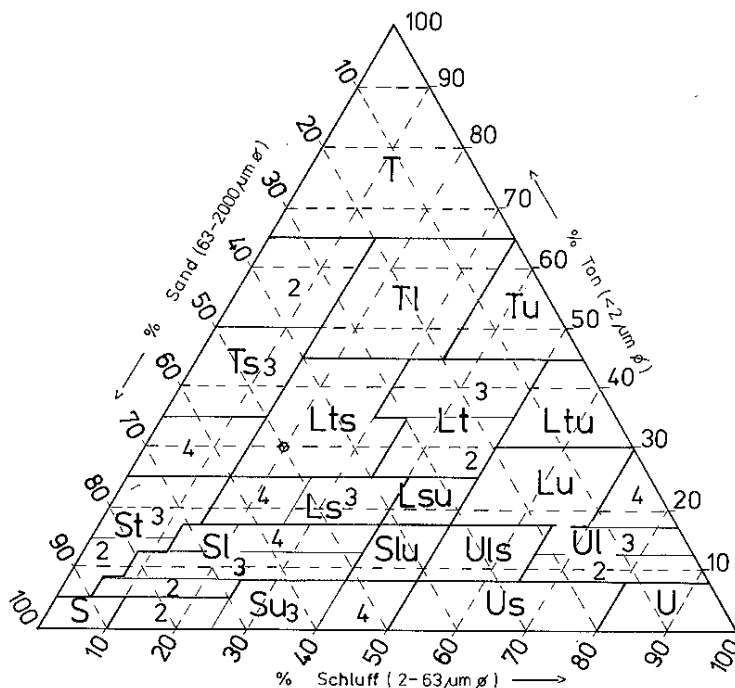


Tabelle 3.1 Partikelanzahl und spezifische Oberfläche der verschiedenen Korngrößenfraktionen (amerikanische Klassifikation, nach Barber 1995).

Korngröße	Partikelanzahl (g ⁻¹)	spez. Oberfläche (cm ² g ⁻¹)
sehr grober Sand	112	15.4
grober Sand	895	30.8
mittlerer Sand	7.1 x 10 ³	61.6
feiner Sand	7.0 x 10 ⁴	132
sehr feiner Sand	89 x 10 ⁵	308
Schluff	2 x 10 ⁷	888
Ton (nicht aufweitbar)	4 x 10 ¹¹	4 x 10 ⁵
Ton (aufweitbar)	4 x 10 ¹¹	8 x 10 ⁶

Tabelle 3.2 Wasserspannung und Porendurchmesser.

Porenklasse	Ø (µm)	Saugspannung	
		pF	cm Wassersäule
Feinporen	< 0.2	> 4.2	> 15 000
Mittelporen	0.2 - 10	2.5 - 4.2	300 - 15 000
feine Grobporen	10 - 50	1.8 - 2.5	60 - 300
grobe Grobporen	> 50	< 1.8	< 60

Abbildung 3.3 Desorptionskurven von Sand-, tonigem Schluff- und Tonboden (nach Scheffer Schachtschabel 1992).

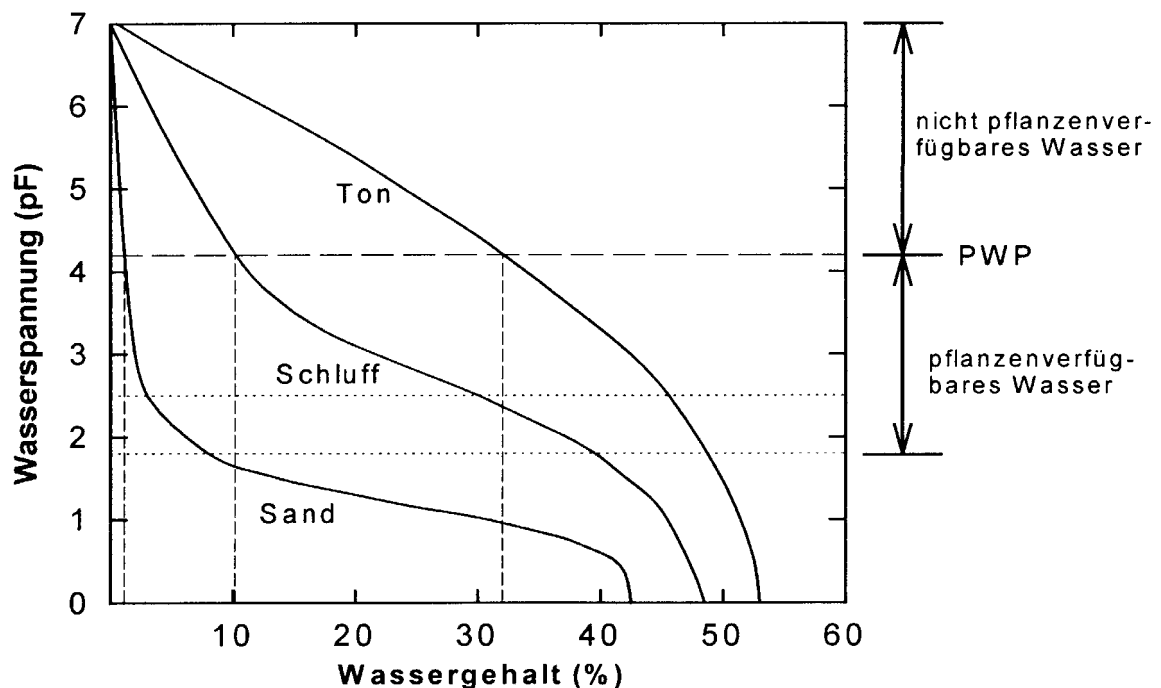


Tabelle 3.3 Wirkung einer kombinierten Grün- und Stallmistdüngung auf die Bildung wasserstabiler Aggregate in einem Lehm Boden (nach Scheffer Schachtschabel 1992).

Durchmesser der Aggregate (mm)	Anteil wasserstabiler Aggregate (%)	
	ohne Düngung	mit Düngung
> 4	8.2	20.8
4 - 2	7.6	12.0
2 - 1	9.3	11.8
1 - 0.5	12.4	15.8
0.5 - 0.25	23.7	17.5
0.25 - 0.10	4.1	2.5
< 0.10	34.7	19.7

Die Düngung erfolgte im Abstand von zwei Jahren während einer Versuchsdauer von 20 Jahren.

Tabelle 3.4 Anzustrebende Bodenreaktion (Ziel-pH) von Acker und Grünland als Durchschnittswerte der unterschiedlichen Richtwerte der Länder (nach Finck 1980).

Bodenart	Ton- bzw. Humusgehalt	pH - Ziel	
		Acker	Grünland
Mineralböden (< 4% Humus)			
Lehm, ton. Lehm, Ton	> 20/25 % Ton	7.0	6.0
sandiger Lehm	12/15 - 20/25 % Ton	6.5	5.5
lehmiger Sand	5 - 12/15 % Ton	6.0	5.0
Sand	0 - 5 % Ton	5.5	5.0
Humusreiche Böden (> 4% Humus)			
stark humoser Sand	4 - 8 % Humus	5.5/5.0	5.0
sehr stark humoser Sand	8 - 15 % Humus	5.0	4.5
anmooriger Sand	15 - 30 % Humus	4.5	4.5
Hochmoor	> 30 % Humus	4.0	4.5
Niedermoor, basenreich	> 15 % Humus	6 - 7	6 - 6.5

Tabelle 3.5 Kalkdünger (Auswahl nach Finck 1992).

Düngertyp	Zusammensetzung	Gehalt an Bezugsbasis
Kohlensaurer Kalk		
(aus Kalkstein, Dolomit, Kreide)		alle:
Kohlensaurer Kalk (Kalkmergel)	CaCO_3	> 75 %
Kohlensaurer Kalk mit Magnesium	CaCO_3 , 5 - 14 % MgCO_3	Gesamtcarbonat
Kohlensaurer Magnesiumkalk	CaCO_3 , > 15 % MgCO_3	$(\text{CaCO}_3 + \text{MgCO}_3)$
Brannt- und Löschkalk		
Branntkalk	CaO	> 65 % CaO
Magnesium-Branntkalk	CaO , > 15 % MgO	> 65 % $\text{CaO} + \text{MgO}$
Löschkalk	$\text{Ca}(\text{OH})_2$	> 60 % CaO
Industriekalke		
Hüttenkalk	ca. Ca_2SiO_4	> 42 % CaO
Konverterkalk	Ca-silikate, CaO , u. a.	> 40 % CaO
Rückstandkalk	CaCO_3 , u.a.	> 30 % CaCO_3
Kalkdünger mit Zugaben		
Kohlensaurer Kalk mit	> 65 % CaCO_3 , > 3 % P_2O_5	
Rohphosphat	> 35 % CaO , > 3 % P_2O_5	
Konverterkalk mit Phosphat	> 65 % CaCO_3 , Torf	
Kohlensaurer Kalk mit Torf		

Abbildung 3.4 Modell der Schichtsilikate mit Zwischenschichten, Aufweitungs- und Austauschpositionen (Mengel und Kirkby 1987).

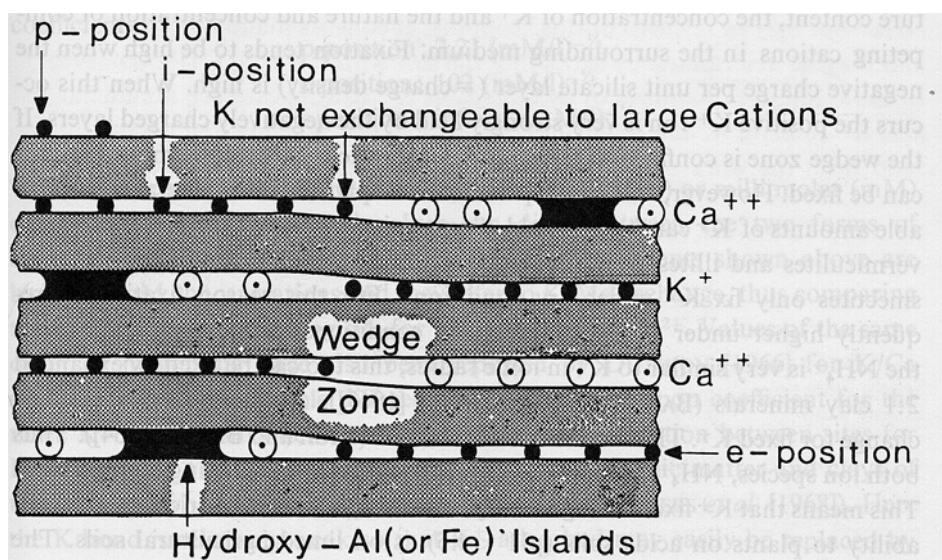


Tabelle 3.6 Kationenaustauschkapazität (KAK) von Tonmineralen, Huminstoffen und Oberböden (nach Schröder 1992, Scheffer Schachtschabel 1992).

	KAK (mval 100 g ⁻¹)				
Tonminerale					
Kaolinit	5 - 15				
Chlorit	10 - 40				
Illit	20 - 50				
Montmorillonit	80 - 120				
Vermiculit	100 - 150				
Huminstoffe	200 - 500				

Böden*	mval kg ⁻¹	Gehalt an		Anteil an der Gesamt-KAK	
		C (%)	Ton (%)	organisch	anorganisch
Schwarzerde (Löß)	200	1.74	16.8	46	54
Parabraunerde (Löß)	169	1.16	19.5	24	76
Kalk- und Kleimarsch	285	2.45	34.4	33	67
Podsole	119	3.02	4.4	78	22

* Mittelwerte von 18 (Podsol-) bis 400 (Marsch-) Böden.

Tabelle 3.7 Extraktionsverfahren zur Bestimmung der K-Versorgung von Böden.

Methode	Zusammensetzung	pH	Extraktions- verhältnis	Extraktions- zeit
K(NH ₄) Ammoniumacetat	1 M Ammoniumacetat	7.0	1 : 20	1 h
K(HCl) Salzsäure	0.1 M HCl		1 : 10	1 h
K(AL) Ammoniumlactat	0.1 M Ammonium-lactat 0.4 M Essigsäure	3.0	1 : 20	2 h
K(DL) Doppellactat	0.02 M Calciumlactat 0.02 M HCl	3.7	1 : 50	2 h
K(CAL) Calciumacetatlactat	0.05 M Calciumlactat 0.05 M Calciumacetat 0.3 M Essigsäure	4.1	1 : 20	2 h
K(CaCl ₂) Calciumchlorid	0.0125 M CaCl ₂		1 : 10	1 h

Tabelle 3.8 Mittlere relative K-Gehalte von Böden gemessen in verschiedenen Extraktionsmitteln und in Abhängigkeit vom Tongehalt ($K(NH_4)=100$) (Schachtschabel und Koester 1978).

Methode	Anteile der Fraktion < 2 µm (%)					
	8	16	24	32	40	48
K(HCl)	113	103	93	86	80	76
K(AL)	116	104	95	90	86	83
K(DL)	92	78	71	67	63	59
K(CAL)	85	71	64	60	56	52
K(CaCl ₂)	60	44	36	32	28	24

Abbildung 3.6 Schema zur Ermittlung der Düngungsempfehlung basierend auf den Ergebnissen der Bodenuntersuchung.

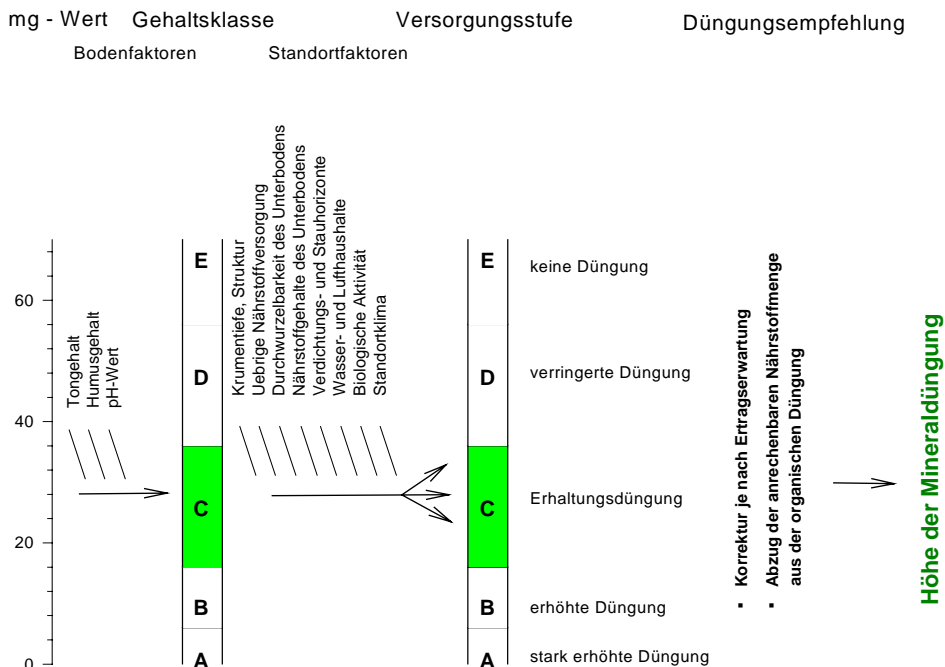


Tabelle 3.9 Einteilung der Gehaltsstufen für CAL-lösliches Phosphat und Kalium (mg/100 g Boden) in Ackerböden (LBP 1997).

Gehaltsstufe	P ₂ O ₅		K ₂ O	
	leichte Böden	mittlere Böden	schwere Böden	
A niedrig	< 5	< 4	< 5	< 7
B mittel	5 - 9	4 - 7	5 - 9	7 - 14
C optimal	10 - 20	8 - 15	10 - 20	15 - 25
D hoch	21 - 30	16 - 25	21 - 30	26 - 35
E sehr hoch	> 30	> 25	> 30	> 35