

Kalk – Basis für Bodenfruchtbarkeit

Einsatz in der Landwirtschaft

Praxisratgeber von Josef Galler



Herausgeber: Landwirtschaftskammer Salzburg
Autor: Dipl.-HLFL-Ing. Josef Galler, Landwirtschaftskammer Salzburg
Foto Titelseite: Ammonit Perisphinctes sp./Dr. F. Krantz,
Rheinisches Mineralien-Kontor GmbH & Co. KG
Grafik: AWMA – Agrar Werbe- und Mediaagentur, Salzburg
Druck: KB-Offset, Regau
Auflage 2013

Inhaltsverzeichnis

Was ist Kalk

Entstehung von Kalken.....	6
Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht.....	7
Gewinnung von Kalk und Anwendungsbereiche.....	7
Was sind Düngekalke.....	8
Unterschied zwischen Kalk, Calcium und Gips.....	8
Unterschied zwischen Kalksteinmehlen und Urgesteinsmehlen.....	9
Geschichte der Kalkdüngung	
Kalk – reiche Väter und arme Söhne.....	10

Böden – unsere Lebensgrundlage.....

Bodenfruchtbarkeit – Kalk schafft die Basis.....	11
Bodenentstehung und Bodentypen.....	11
Entwicklungsgeschichte der Böden.....	12
Bodenbestandteile, Bodenarten und Bodengefüge.....	13
Bodentypen – Die wichtigsten Bodentypen in Österreich.....	16

pH-Wert – Leitparameter für die Bodenfruchtbarkeit.....

pH-Wert beeinflusst Bodeneigenschaften.....	19
Bodenversauerung kontrollieren.....	20
pH-Wert und Freisetzung von Aluminium.....	20
Anzustrebende pH-Werte im Boden.....	21
pH-Schwankungen im Boden.....	21
Kulturpflanzen haben unterschiedliche pH-Ansprüche.....	21
pH-Wert und Bodenleben.....	22
pH-Wert beeinflusst Nährstoffverfügbarkeit.....	22
pH-Wert und Phosphatmobilisierung.....	23
Standortfaktoren und Nährstoffverfügbarkeit.....	25
Synergismus und Antagonismus beeinflussen Nährstoffverfügbarkeit.....	25

Puffer- und Speichersysteme im Boden.....

Was versteht man unter Pufferung.....	26
Puffersysteme des Bodens.....	27
Wie puffert Kalk im Boden.....	27
Carbonatpufferung.....	27
Pufferung mit Branntkalk.....	28

Ionenaustauschkapazität.....

Kationenaustauschkapazität (KAK).....	30
Anionenaustauschkapazität (AAK).....	31
Kationenbelegung am Sorptionskomplex.....	31
Was sagt die Basensättigung (BS-Wert).....	32
Ton und Humus beeinflussen Austauschkapazität.....	32
Kationenauswaschung – Verlust an Bodenfruchtbarkeit.....	32

Bodenversauerung – mehrere Ursachen.....

Was versteht man unter Bodenversauerung.....	33
Natürliche Einflussfaktoren der Bodenversauerung.....	33
Basenverluste durch Auswaschung.....	34
Anionenauswaschung – Schlepper für basische Kationen.....	34
Bodenatmung – natürliche Ursache der Bodenversauerung.....	35
Nährstoffaufnahme und Ernteentzug wirken versauernd.....	36
Humusbildung belastet Basenhaushalt.....	36
Versauerung durch Mineraldünger und Immissionen.....	37
Warum versauert der Oberboden.....	38

Folgen der Bodenversauerung.....

Bodenversauerung hemmt Humusbildung.....	38
--	----

Versauerung fördert Podsolierung.....	39
Versauerung führt zur Ton-Schluff-Trennung.....	39
Bodenversauerung reduziert Wurzelwachstum.....	39
Aufgaben der Kalkung	
Kalkung fördert Bodenleben	40
Kalkung fördert Leguminosen.....	42
Düngung von Calcium und Magnesium – essentielle Pflanzennährstoffe	43
Calcium – Aufgaben in der Fütterung.....	45
Kalk und Humus fördern Bodenstruktur	
Ton-Humus-Komplex – Calcium bildet die Brücke	45
Festgare – nicht nachhaltig	45
Tonflockung lockert den Boden.....	46
Stabile Kettenbildung durch Calcium und Magnesium	46
Freier Kalk bewirkt Porenwinkel-Vermörtelung.....	47
Calciumsättigung am Sorptionskomplex	47
Kalk erhöht Regenverdaulichkeit	48
Stabile Bodenstruktur erleichtert Bodenbearbeitung	48
Kalkung reduziert Verschlammung, Verkrustung und Erosion.....	49
Kalkung beugt Auslaufschäden vor	49
Zwischenfrüchte helfen Boden zu stabilisieren.....	49
Gärsubstrate und Kalk	50
Düngekalke – Gruppen und Formen	
Naturkalke aus natürlichen Rohstofflagerstätten.....	
Kohlensaure Kalke bzw. Magnesiumkalke	52
Branntkalke und Mischkalke	53
Anwendungsformen.....	
Mehle (vermahlene Kalk-/Dolomitsteine)	54
Granulate (regranulierte Mehle)	54
Körnungen (gesiebte Bruchkörner)	54
Natur-Feuchtkalke (angefeuchtete Mehle)	54
Mischungen mit anderen Nährstoffen	54
Rückstandskalke und Gips.....	
Carbokalk	55
Konverterkalk	55
Bedeutung der Kieselsäure.....	55
Hüttenkalk.....	56
Schwarzkalk	56
Zelka.....	56
Zitrogips	56
Bedeutende Düngekalke am österreichischen Markt	57
Qualitätskriterien von Düngekalcken	
Kalkwert – Reinkalkgehalt in kg CaO oder Säureneutralisations-Wert (SNW).....	58
Berechnung des Kalkbedarfes.....	58
Kalkbindungsform und Löslichkeit	59
Mahlfeinheit bei ungebrannten Naturkalcken beachten	60
Reaktivität – Messzahl für Wirkungsgeschwindigkeit	60
Reinnährstoffpreis (Preis pro kg CaO)	61
Umrechnungsfaktoren, Schüttgewichte und Farbe	61
Düngemittelrechtliche Vorgaben	62
Kosten der Kalkdüngung	62
Vertriebsformen der Düngekalke	
Lose-(Silo-)Umschlag	63
Sack-(Big Bag-)Umschlag.....	64
Boden-Umschlag mit Feuchtkalk und Granulaten	64

Praxis der Kalk-Anwendung	
Einsatz und Wirkungsbereiche verschiedener Kalkformen	65
Kalke sind Bodenverbesserungsmittel	65
Mehle wirken besser	65
Zeitpunkt der Kalkung	66
Aufwandmengen der Kalkung	66
Ermittlung des Kalkbedarfes	67
Kalkung auf Ackerland	
Erhaltungskalkung – Gesundungskalkung – Meliorationskalkung	68
Wann welchen Kalk verwenden	68
Stoppelkalkung (Erhaltungskalkung)	69
Vorsaatkalkung	70
Maisstrohkalkung	70
Einsatz von Branntkalk	71
Kalkdüngung im Grünland	
Anzustrebende pH-Bereiche für Grünland	73
Viehbesatz fördert Nährstoffkreislauf	73
Versauerung fördert Podsolierung	74
Vernässung – Folge der Versauerung	74
Versauerung fördert Wassererosion	74
Futteranalyse erlaubt keine Aussage über Kalkversorgung	75
Kalkdüngung fördert wertvolle Futtergräser	75
Zeigerpflanzen verraten Kalkversorgung	76
Kalkausbringung auf Grünland, Weiden und Almen	77
Waldkalkung	
pH-Wert und Basensättigung kontrollieren	78
Magnesium und Kalium	78
Kalkansprüche von Bäumen	79
Wirtschaftlichkeit der Waldkalkung	80
Kalkeinsatz in der Teichwirtschaft	
Teichdüngung	80
Sanierung eutropher Seen durch Kalkung	81
Bodenansprache, Bodenprobenahme, Schnelltests	
Was sagt der Carbonat-Test (Kalk-Test)	84
Spezielle Fragen der Kalkung	
Kalkeinsatz in der Stallhygiene	85
Aufbau einer Kalkstroh-Liegematratze	86
Einsatz von Güllekalk	87
Wirtschaftsdünger und Kalkausbringung	87
Gips und Kalk	88
Kalkung bei hohen pH-Werten	88
Winterkalkung	89
Graukalk, Algenkalk, Meereskalk	89
Welche Kalkdünger sind biokonform	90
Mikrofeine Carbonatmehle	91
Methoden der Kalkbedarfsermittlung	91
Mineraldünger – Kalkzehrer und Kalkmehrer	92
Literatur, Schlagwörterverzeichnis	94
Geologische Karte von Österreich	98
Bodenkarte von Österreich	100
Sachregister	102

Was ist Kalk

Die oberste Erdkruste enthält gebunden in Mineralien etwa 5% Reinkalk (CaO), welcher nach Verwitterungsprozessen freigesetzt und über das Grundwasser bzw. Flüsse bis in die Meere gelangen kann. Er bildet auch die Basis für fruchtbare Böden.



Kalkstein

Als **Kalk** (Kalkstein) werden carbonatische Bindungsformen von Calcium bezeichnet, die überwiegend aus den Mineralien Calcit und Aragonit bestehen. Das sind zwei Kristallisationsformen von Calciumcarbonat (CaCO_3), welches chemisch gesehen ein Salz der Kohlensäure ist.

Kalkstein (auch als Kohlensäurer Kalk, Calcit oder Kalkspat bezeichnet) kommt meist vergesellschaftet mit anderen Mineralien wie dem **Dolomit (magnesiumhaltigen Kalkstein)**, verschiedenen Tonmineralen, Quarz, Gips etc. vor. Überwiegt der Dolomitanteil, spricht man von einem Dolomitgestein. Besitzt der Kalkstein einen höheren Anteil an Tonmineralen, spricht man von einem **Mergel**.

Unter dem Begriff „Kalkstein“ werden mehr oder weniger stark verfestigte alpine Kalksteine verstanden, aber auch mürbere Gesteine wie **Kreidekalke** (weichere Sedimentgesteine), die durch Ausgasung von Kohlensäure aus dem Meerwasser entstanden und wieder zu Kalk (CaCO_3) ausgefällt wurden. Aber auch polierfähige Kalksteine wie der **Marmor**, die durch Umkristallisierung von Kalken unter hohen Temperaturen und Drücken im Erdkrusteninneren entstanden sind, zählen zu den Kalksteinen.

Gipse sind hingegen sulfatische Bindungsformen an Calcium (CaSO_4). Sie gehören damit nicht zur Kalkgruppe. Gips entsteht entweder durch Auskristallisation von aus mit Calciumsulfat übersättigtem Meerwasser oder als Verwitterungsprodukt sulfidischer Erze bzw. auch aus vulkanischen Schloten (sog. White Smoker) [Siehe Seiten 8, 56, 88].



Kalkgebirge (Nationalpark-Kalkalpen)

Entstehung der Kalke

Die Entstehung der Kalke fand vor allem in der Kreide- und Jurazeit vor 65 bis 200 Mio. Jahren in den Meeren aus abgelagerten Lebewesen wie Muscheln, Schnecken, Korallen etc. statt. Damals setzte sich durch Sedimentation am Meeresgrund Schicht für Schicht zu einem mächtigen Kalkgestein ab. Erst nach Anhebung des Meeresbodens (Gebirgsfaltung) kam dann das Kalkgestein auch oberirdisch zum Vorschein. Prozesse der Kalksteinbildung vollziehen sich auch heute noch in Form von „Festländischer Kalksteinbildung“ aus Grundwasser oder seichtem Stauwasser in Abhängigkeit von der Temperatur. Der gelöste Teil wandert vielfach bis zum Meer, welches einen mittleren Gehalt an gelöstem Calcium-Hydrogencarbonat von 50 mg/l aufweist. In den Weltmeeren wird es dann als festes Calciumcarbonat in Form von Korallenriffen und Muschelbänken gebunden.



Kreidefelsen (Südengland)

Kalk kann in küstennahen Meeresteilen bei höheren Temperaturen (besonders in tropischen Klimagebieten) auch durch Verdunstung des Wassers als Kalkschlamm ausgefällt werden.

Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht im Wasser

Calciumcarbonat (CaCO_3) selbst ist in reinem Wasser kaum löslich. Es löst sich hauptsächlich unter dem Einfluss des CO_2 -Partialdruckes.

Bei Anwesenheit von gelöstem Kohlendioxid (CO_2) entsteht in Verbindung mit Wasser Kohlensäure (H_2CO_3), welches das schwer lösliche Calciumcarbonat (CaCO_3) im Zuge der Kohlensäurepufferung zum leichter löslichen Calciumhydrogencarbonat $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ löst (siehe auch Carbonatpufferung Seite 27).

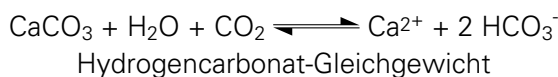
Dieses Puffersystem kommt wegen seiner hohen Löslichkeit in allen Meeren sowie Süßwässern vor. Auf diesem Effekt der Bildung von leicht löslichem Calciumhydrogencarbonat mit Hilfe von Kohlensäure beruht auch die Verwitterung von Kalkgesteinen (sog. Carbonatverwitterung).

Der Umkehrvorgang von diesem Lösungsprozess erfolgt bei Entzug von Kohlensäure durch Ausgasung von Kohlendioxid (CO_2). Dies geschieht z. B. bei Temperaturerhöhung des Wasser (z. B. im Frühling) bzw. bei Erhöhung des pH-Wertes im Wasser über 6.5.

Dadurch kommt es wieder zur Kalksteinbildung (= CaCO_3). Viele der heutigen Kalkvorkommen verdanken diesem Prozess ihre natürliche Entstehung.

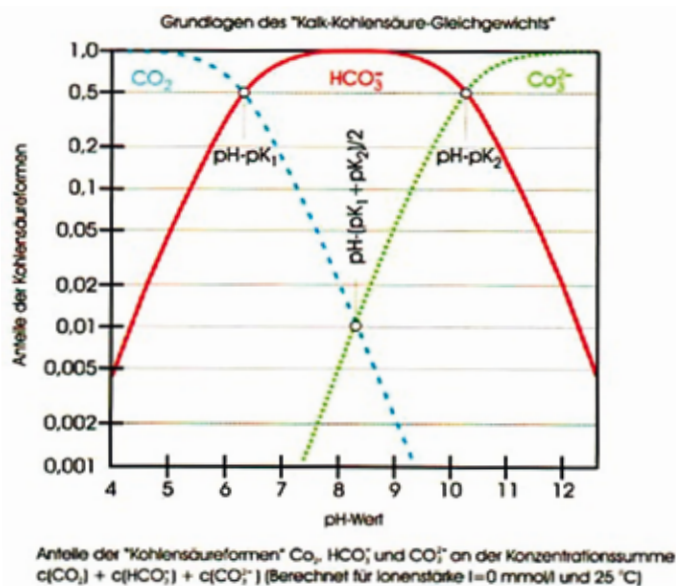
Bei einer globalen Abkühlung wird z. B. in den Meeren wieder mehr CO_2 gebunden, während zum Ausgleich der Gehalt in der Atmosphäre zurückgeht. Dieser Prozess ist auch jährlich über die Wintermonate zu beobachten. Bei einer globalen Erwärmung wird hingegen wieder mehr CO_2 aus den Meeren freigesetzt.

Der Mechanismus der Kalkbildung ist auch sichtbar, so etwa bei den Kalkterrassen in Pamukkale (Türkei). Er wird durch das Kalk-Kohlensäureverhältnis bestimmt.



Gewinnung von Kalk

Kalkstein wird im Terrassenbau abgesprengt, in „Brecher“ zerkleinert bzw. zu Mehlen verarbeitet. Durch Brennen des Kalksteins (CaCO_3) entsteht im Kalkofen nach der Austreibung von CO_2 in die Atmosphäre **Branntkalk** = Calciumoxid (CaO), auch als Reinkalk bezeichnet.



Terrassenabbau durch Absprengung von Kalkstein

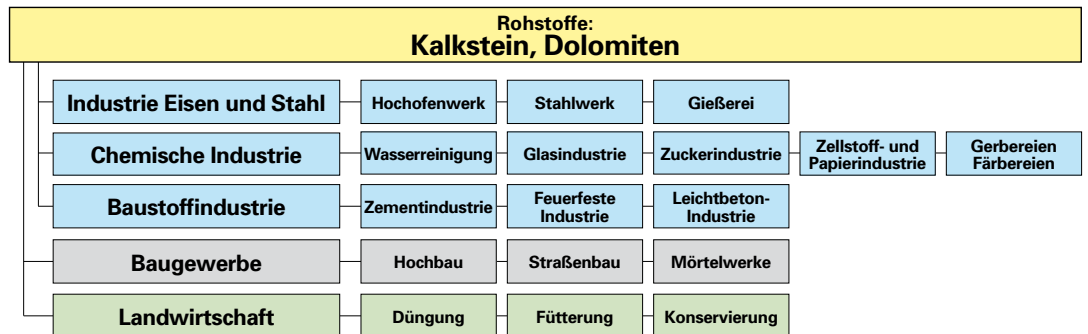
Kalksteinabbau im Steinbruch und Zerkleinerung im Brecher

Abb. Kalkofen



Anwendungsbereiche von Kalkprodukten

Kalksteinprodukte werden nicht nur in der Landwirtschaft, sondern vor allem als Rohstoff in der Bau- und Zementindustrie, Eisen- und Stahlindustrie sowie für verschiedene industrielle Prozesse in der Papier-, Farbstoff- und Kunststoffindustrie etc. verwendet. Auch in der Lebensmittelindustrie wird Kalk oft als natürlicher Filter verwendet (Carbokalk ist z. B. der Filtrerrückstand aus der Zuckersaftreinigung mit Kalkmilch).



Was sind Düngekalke

Düngekalke sind Produkte aus gemahlener oder gebrannter Kalkstein bzw. verschiedenen Rückstandskalken.

Die Wirkung der Kalke beruht vor allem auf der Neutralisation von Säuren (H^+ -Ionen) durch die aus dem Kalk im Zuge der Pufferung freigesetzten OH^- -Ionen (siehe Kapitel Puffer- und Speichersysteme im Boden, Seite 27).

Düngekalke dienen nicht nur der Neutralisation von Bodensäuren, sondern auch der Bereitstellung von Calcium und Magnesium als Pflanzennährstoffe.

Die zweiwertigen Ionen (Ca^{++} , Mg^{++}) sind vor allem auch für die Bodenstrukturbildung wichtig.

Unterschied zwischen Kalk, Calcium und Gips

Als **Kalk ($CaCO_3$)** wird das Calciumcarbonat, d. h. die carbonatische Bindungsform von Calcium bezeichnet.

Das **Calcium (Ca^{++})** als Ion dient dabei einerseits der Pflanze als Pflanzennährstoff und andererseits dem Boden als Mörtel bei der Ton-Humus-Komplexbildung und somit der Verbesserung der Bodenstruktur. Der Carbonatrest bzw. die bei der Pufferung freigesetzten OH^- -Ionen bewirken hingegen die Neutralisation von Bodensäuren.

Gips ($CaSO_4$)

Gips ist durch seinen Sulfatgehalt (18 % S) vorrangig ein Schwefeldünger, kann aber auch durch seinen Calciumgehalt die Bodenstruktur verbessern. Gips kann jedoch kei-

ne Basen (OH-Ionen) bilden und dadurch auch den pH-Wert des Bodens nicht erhöhen. Eine besondere Rolle spielt die Gipsdüngung auf alkalischen Salzböden, wo der pH-Wert nicht mehr angehoben, aber dennoch über das Calcium der Natriumgehalt von den Austauschern verdrängt werden soll.

Unterschied zwischen Kalksteinmehl und Urgesteinsmehl

Während Kalk- bzw. Dolomitgesteine aus Sedimentation und Ablagerungen stammen, sind die Urgesteine bezüglich ihrer Entstehung nach dem Austritt von flüssigem Magma aus dem Erdinneren erstarrt. Sie werden deshalb auch als Erstarrungsgesteine bezeichnet. Ihre Hauptkomponenten sind Silikate, Basalt, Diabas, Quarz.

„**Urgesteinsmehle**“ sind nach dem DMG keine Düngemittel, da sie keine nennenswerte Düngewirkung besitzen. Sie haben im Vergleich zu Hüttenkalken auch keine nennenswerte Silikatwirkung (siehe Bedeutung der Kieselsäure auf Seite 55).

Bezüglich der Anwendung von Gesteinsmehlen gibt es eine offizielle Stellungnahme seitens des BMLFUW durch den Fachbeirat für Bodenschutz und Bodenfruchtbarkeit vom 6. 12. 2005

Geschichte der Kalkung

Die Geschichte der Düngung reicht bis zu den Anfängen des Ackerbaus vor etwa 10.000 Jahren zurück, wo durch die Klimaerwärmung nach der letzten Eiszeit auch die „Sesshaftwerdung des Menschen“ begann.

Schon damals sammelten die alten Kulturen am Nil, Euphrat und Indus Erfahrungen mit der Düngung von Flussschlämmen, die ständig Nährstoffe nachgeliefert haben. Später wurden auch Komposte, Waldstreu, Holzaschen und Fäkalien etc. zur Düngung verwendet. Humusträger waren ursprünglich der wichtigste Nährstofflieferant. Der Kalk schaffte erst die Basis für die Bodenfruchtbarkeit.

In unserem Klimaraum entwickelten sich aus den nach der Eiszeit angewehten kalkreichen Lößböden (bis zu 10 % Reinkalkanteil), Geschiebelehmen bzw. kalkreichen Verwitterungsböden fruchtbare Ackerstandorte. Unter den Laubwäldern konnten sich fruchtbare Braunerden entwickeln. Im Zuge der Ackernutzung kam es jedoch im Laufe der Zeit zu Versauerungsprozessen als Folge von Kalkauswaschungsverlusten.

Die Kelten erkannten bereits 500 v. Chr. schon die Notwendigkeit des „Mergelns“, d. h. Aufbringen von Kalkmergel (kalkhaltige Geschiebemergel und Tone).

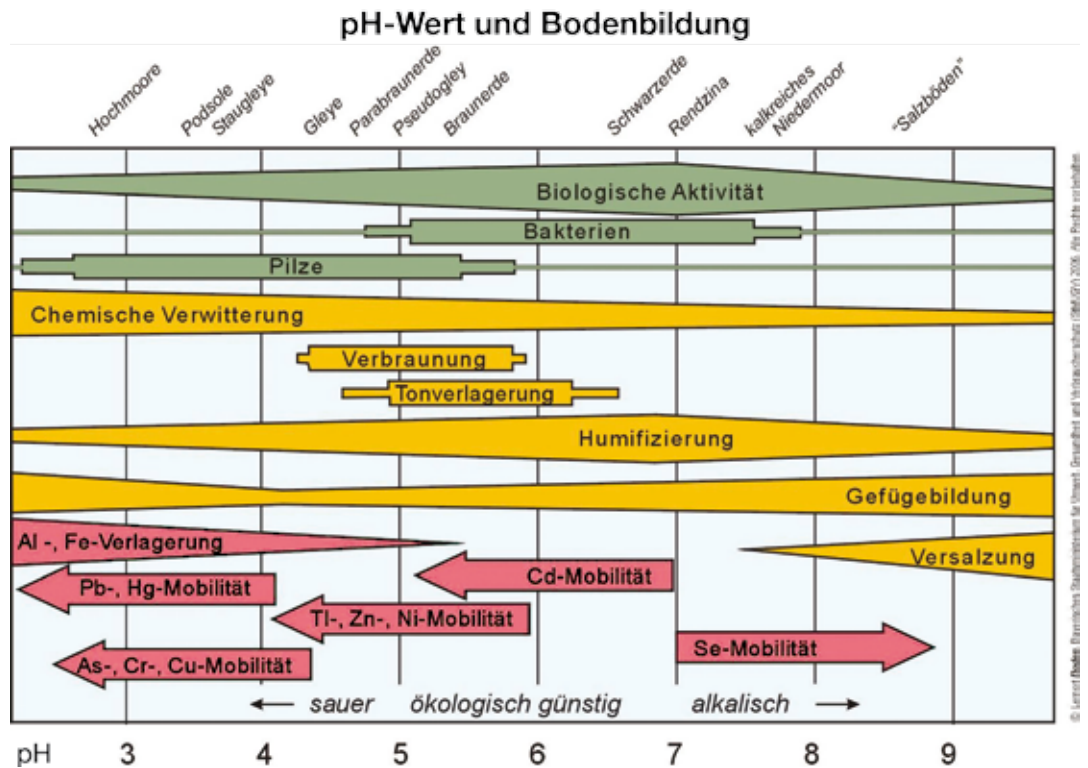
In der Neuzeit um 1800 war das „**Mergeln**“ nach Albrecht Thaer (1752–1828) die wichtigste Maßnahme, um die „ausgemergelten“ (entkalkten) Felder wieder fruchtbar zu machen. Die Mergelgrube ist die Goldgrube des Bauern (Hamm, 1872). Dadurch konnten auch saure Böden, die aus kalkarmen Gesteinen wie Granit, Gneis, Sandstein entstanden sind, wieder ackerbaulich genutzt werden.

Meliorationen mit Mergel brachten bis zu 10 t Kalk/ha in die Böden.

Eine gezieltere Kalkung erfolgte später durch den Abbau von Kalksteinen.

Ganz entscheidend verbessert wurde die Kalkbilanz der mitteleuropäischen Böden in den 1950er bis 1980er Jahren durch das „Thomasmehl“, einem phosphathaltigen Rückstandskalk aus der Stahlproduktion, welcher mit einem CaO-Gehalt von rund 45 % weit mehr brachte als das ursprüngliche „Mergeln“.

Kalk ist in erster Linie ein Bodendünger. Er bildet die „Basis für die Bodenfruchtbarkeit“. Wertvolle Bodentypen wie Braunerden, Parabraunerden und Schwarzerden konnten nur bei guter Kalkversorgung entstehen.



Kalk macht „reiche Väter und arme Söhne“

In früherer Zeit erfolgte die Düngung fast ausschließlich über die Zufuhr von Kalkmergel. Kalkung fördert das Bodenleben, die Nährstoffumsetzung und auch den Ertrag. Da aber die mit der Ernte vom Feld abgeführten Hauptnährstoffe damals vielfach nicht wieder ersetzt werden konnten, kam es zu einer Verarmung der Böden. Daraus entstand der Begriff des ausgemergelten Bodens.

Nährstoffmangel war bis zur Zeit von Justus von Liebig (1803–1873), dem Begründer der Düngerlehre, auch der Grund, warum die Dreifelderwirtschaft über ein Jahrtausend gedauert hat. Dabei folgte nach zwei Jahren Ackerbau ein Jahr Brache, um den Boden wieder über die natürliche Begrünung Zeit zur Humusbildung und damit wieder Nährstoffanreicherung zu geben.

Infolge der nährstoffmobilisierenden Wirkung des Mergels bei sonst fehlender Ergänzungsdüngung ergab sich der aus heutiger Sicht irreführende Spruch: „Kalk macht über die Humusmobilisierung zuerst *reiche Väter*, dann aber *arme Söhne*.“ Diese Gefahr des Ausbeutens des Bodens ist heute bei entzugsorientierter Grunddüngung nicht mehr gegeben. Gleichzeitig haben sich inzwischen die Erträge durch Verbesserung in der Züchtung, Bodenbearbeitung, Düngung und der Pflanzenschutz etwa verzehnfacht und dementsprechend ist auch der Nährstoffentzug gestiegen.

Heute sinkt auch langfristig der Humusgehalt durch Kalkdüngung nicht. Es steigt vielmehr die Humusqualität (C/N-Verhältnis). Auf Ackerböden bewirkt heute eine Kalkdüngung keine Verringerung der organischen Substanz (Scheffer-Schachtschabel 2012). Dies liegt u. a. darin begründet, dass die durch die pH-Erhöhung verstärkte Mineralisierung auch durch höhere Vegetationsrückstände im Boden infolge höherer Erträge kompensiert wird.

Böden – unsere Lebensgrundlage

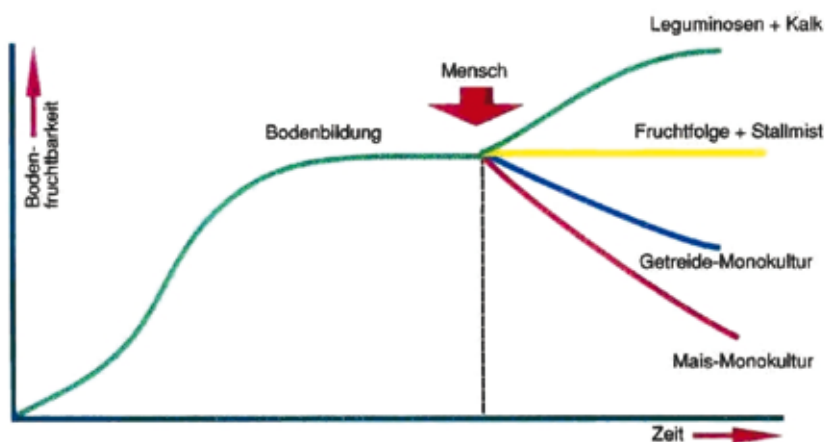
Als Boden bezeichnet man den obersten, in der Regel belebten Teil der Erdkruste. Böden sind durch Verwitterungsvorgänge unter Einfluss des Klimas und des jeweiligen Ausgangsgesteins entstanden und können von den Pflanzen durchwurzelt werden.

Bodenfruchtbarkeit – Kalk schafft die Basis

Unter Bodenfruchtbarkeit versteht man die nachhaltige Fähigkeit eines Bodens Früchte mit hoher Qualität zu tragen, d. h. den Pflanzen vor allem bei der Vermittlung von Wasser, Luft und Nährstoffen behilflich zu sein.

Der Boden ist umso fruchtbarer, je besser er diese Aufgabe entweder von Natur aus erfüllt (= **natürliche Bodenfruchtbarkeit**) oder auf bodenverbessernde Maßnahmen aller Art wie z. B. Bodenbearbeitung, Fruchtfolge, Düngung etc. reagiert (= **erworbene Bodenfruchtbarkeit**). Dabei übt der Kalk sowohl auf die Bodenbildung als auch auf die Erhaltung und Verbesserung der Bodenstruktur und nicht zuletzt auf die Förderung der Leguminosen einen großen Einfluss aus.

Der Mensch beeinflusst Bodenentwicklung und Bodenfruchtbarkeit (n. Jenny, 1990)



Bodenentstehung und Bodentypen

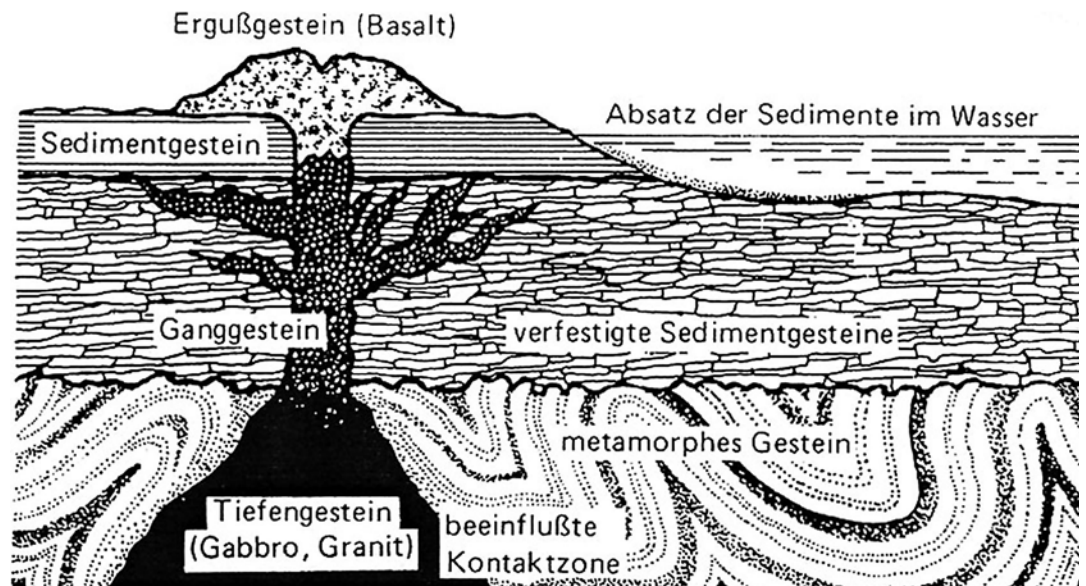
Die Erdkruste entstand beim Erstarren aus der oberen Magma (Lava), einer feuerflüssigen Schmelze. Dabei sind die **Magma- oder Erstarrungsgesteine (Urgesteine)** schon in der Tiefe (sogenannte Tiefengesteine, wie Granit, Syenit, Gabbro etc.) erstarrt, während die **Ergussgesteine** wie Basalt, Quarzporphyr und Diabas erst später an der Erdoberfläche erstarrt sind. Basische Gesteine werden nicht nach dem pH-Wert, sondern nach dem Gehalt an Siliziumdioxid (SiO_2) unterschieden.

Basische Gesteine wie Basalt, Gabbro enthalten 45–52 % SiO_2 , während basenarme (saure) Gesteine wie Granit (bestehend aus Feldspat, Quarz und Glimmer), Gneis oder Rhyolith bis über 65 % SiO_2 enthalten.

Sedimentgesteine oder Absatzgesteine entstanden im Laufe der Erdgeschichte aus Verwitterungsprodukten, die vom Wasser mehr oder weniger weit getragen wurden, bis sie sich letztlich absetzten. Wenn das Wasser erst später verdunstet, können durch Fällung auch Kalke, Gipse oder Salze entstehen. Diese werden in Abhängigkeit von der Korngröße und dem Einfluß des Windes verlagert (z. B. Löß) oder mit dem Gletscher als Geschiebemergel und Moränenkies zu Tal befördert.

Metamorphe Gesteine wie Marmor oder Quarzit sind hingegen aus den vorgenannten Gesteinen unter Einfluss von hohem Druck und Temperaturen in der Erdkruste entstanden.

Schema der Gesteinsbildung n. Kuckuk (n. Oehmichen, 1983)



Entwicklungsgeschichte der Böden

Die Bodenentwicklung, auch „Pedogenese“ genannt, wird durch das Verwittern von Gesteinen durch wechselnde Einflüsse des Klimas auf die Gesteinsverwitterung geprägt. Im Verlauf der Bodenentwicklung wurden aus den Silikaten (Glimmer, Feldspat, Tonminerale bzw. Humus aus dem abgestorbenen Pflanzenmaterial) gebildet. Gleichzeitig kam es aber auch zu Auswaschungsverlusten und damit Entkalkung der Böden. Der Einfluss des Menschen durch die Bodenbearbeitung und die unterschiedliche Nutzung prägten die Entwicklung der Böden.

Im äußersten Fall entstand Karst, wenn ganze Gebirge abgeholzt wurde oder eine Steppe, wenn jährlich weniger als 500 mm Niederschläge fallen. Folgen mehrere Generationen Fichte aufeinander, so können sich unfruchtbare Bleicherden (Podsolböden) bilden, weil dann die Eisenverbindungen ausgewaschen werden, die gemeinsam mit Aluminiumionen und Kieselsäure für eine wertvolle Bodenbildung notwendig sind.

Ackerbau und Viehzucht brachten eine Wende

Die größte Veränderung erfuhren unsere Böden durch den Menschen, der mit der Einführung von Ackerbau und Viehzucht vor etwa 10.000 Jahren (nach der letzten Eiszeit im Würm-Spätglazial) in das natürliche System eingegriffen hat.

Dabei beeinflusste vor allem der natürliche Kalkgehalt des Ausgangsmaterials bzw. Gesteins die Bodenentwicklung markant (siehe auch Geschichte der Kalkung).

Die ursprünglich unter Mischwäldern entstandenen Böden waren aufgrund des vielfach hohen Basen- sowie Humusgehaltes über lange Zeit fruchtbare Ackerböden. Vielfach führte die Ackerung durch die oft fehlende Kalkung und Ausgleichsdüngung mit Phosphat und Kalium zur Versauerung und Degradierung der Böden.

Dabei wurden speziell im humiden (feuchten) Klimaraum Mitteleuropas, wo die Niederschläge höher sind als die Verdunstung, die ursprünglich reichlich vorhandenen Basen (Kalkbestandteile) im Laufe der Zeit großteils ausgewaschen. Dies bewirkte einen natürlichen Versauerungsprozess der Böden.

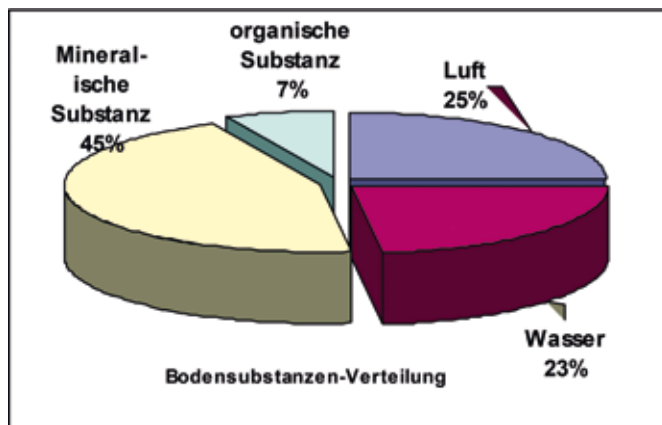
Erst durch das „Mergeln“ (Aufbringung von kalkhaltigem Ton und Lehm), die Einführung einer Fruchtfolge und der regelmäßigen Düngung hat sich die Bodenfruchtbarkeit wieder verbessert. Ohne Kalk gibt es keine nachhaltige Bodenfruchtbarkeit.

Von Natur aus kalkhaltige Böden:

- Schwarzerden und Pararendsina
- Rendstina auf Kalkstein
- Böden auf kalkhaltigem Lehm oder Geschiebemergel

Bodenbestandteile, Bodenarten und Bodengefüge

Ein Boden besteht einerseits aus festen mineralischen und organischen Bestandteilen, andererseits aus dem Bodenwasser und der Bodenluft. Die festen anorganischen Bestandteile sind im Zuge der Gesteinsverwitterung entstanden. Der Anteil der organischen Substanz (Humusgehalt) im Boden wird neben dem Grundwassereinfluss vor allem durch die Düngung und der Art der Nutzung (Acker- oder Grünlandnutzung) geprägt.



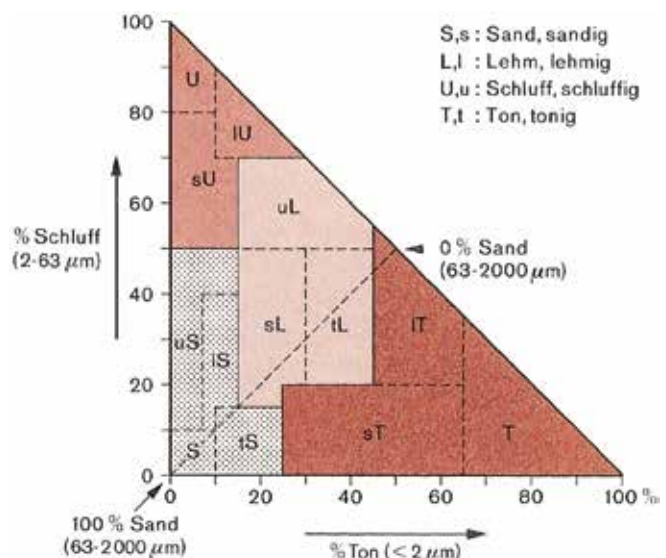
Bodenarten

Der Grad der Verwitterung eines Bodens bestimmt über die Korngrößenverteilung die Bodenart, d. h. ob ein Boden als leicht, mittel oder als schwer eingestuft wird.

Die Bodenart hängt somit von der Korngrößenzusammensetzung (Anteile von Sand mit 2–0,6 mm, Schluff mit 0,06–0,02 mm und Ton < 0,002 mm) ab. Bei der Bodenart „Lehm“ haben alle drei Korngrößen einen relativ ausgeglichenen Anteil.

1. Einteilung der Bodenarten

	Bodenartengruppe		Bodenarten Hauptgruppe
ss	Reiner Sand		
us	Schluff-Sande	s	Sande
ls	Lehm-Sande		
s	Sand-Lehme		
ul	Schluff-Lehme	l	Lehme
tl	Ton-Lehme		
su	Sand-Schluffe		
lu	Lehm-Schluffe	u	Schluffe
tu	Ton-Schluffe		
ut	Schluff-Tone	t	Tone
lt	Lehm-Tone		



Leichte Böden haben einen Tongehalt von unter 15 % und wegen des hohen Sandanteiles einen hohen Grobporenanteil von 30–40 %. Sie sind von Natur aus gut durchlüftet und können dadurch große Wassermengen schnell in den Untergrund ableiten. Leichte Böden sind jedoch weniger gepuffert und neigen dadurch leichter zur Versauerung.

Mittelschwere Böden (schluffige bis klassische Lehmböden) haben einen Tongehalt von 15 bis 25 %. Sie sind die besten Ackerböden (Braunerden, Parabraunerden). Mit zunehmendem Tonanteil sind sie jedoch verschlammungsgefährdet, vor allem wenn die Calcium- und Magnesiumsättigung am Sorptionskomplex unter 70 % absinkt. Auf schwereren Böden (schluffigem Lehm) kann es bereits bei pH-Werten unter 6,2 zu instabilen Verhältnissen und zur **Ton-Schluff-Trennung** kommen, wobei sich oben eine Schluffkruste bildet, während der Ton nach unten verlagert wird. Erfolgt hier keine Gesundungskalkung, kommt es zur **Pseudovergleyung** infolge von Tonverlagerung, die letztlich zur Verdichtung und Vernässung im Unterboden führen kann.

Schwere Böden mit Tongehalten über 25 % werden häufig als Grünland genutzt. Sie sind ackerbaulich nur nutzbar, wenn sie humusreich sind und noch mit „freiem Kalk“ angereichert sind, der für eine ausreichende Krümelstruktur sorgt.

Unsere besseren Böden (z. B. Parabraunerden aus Löß) haben etwa einen Anteil von 20 bis 25 % Ton, 60 bis 70 % Schluff und 10 bis 20 % Sand.

Von einem fruchtbaren Boden kann man erst sprechen, wenn ein ausreichendes Porenvolumen, d. h. ein guter Luft- und Wasserhaushalt und ein dementsprechend aktives Bodenleben vorhanden ist.

Anteil Porenvolumens und Porengrößenanteile am Gesamtvolumen von Mineralböden (C-Gehalt bis 2 %) und organischen Böden

(n. Scheffer/Schachtschabel, 2002)

	Porenvolumen (%)	Grobporen (%)	Mittelporen (%)	Feinporen (%)
Sande	46 ± 10	30 ± 10	7 ± 5	5 ± 3
Schluffe	47 ± 9	15 ± 10	15 ± 7	15 ± 5
Tone	50 ± 15	8 ± 5	10 ± 5	35 ± 10
Anmoore	70 ± 10	5 ± 3	40 ± 10	25 ± 10
Hochmoore	85 ± 10	25 ± 10	40 ± 10	25 ± 10

Meliorationskalkung verbessert Grobporenanteil

Je schwerer (tonreicher) ein Boden ist, desto wichtiger wird für die Belüftung und Wasserableitung ein hoher Grobporenanteil. Gleichzeitig wird die Bodenerwärmung im Frühling sowie der Gasaustausch (CO₂ + O₂) zwischen Boden und Atmosphäre verbessert.

Auf schweren Böden kann der Grobporenanteil im Oberboden sowie im Pflugsohlenbereich auf verdichteten Böden durch eine Meliorationskalkung wieder deutlich verbessert werden (Meliorationskalkung siehe Seite 68).

Porengrößenverteilung nach Meliorationskalkung (n. Schuhbauer, 1998)

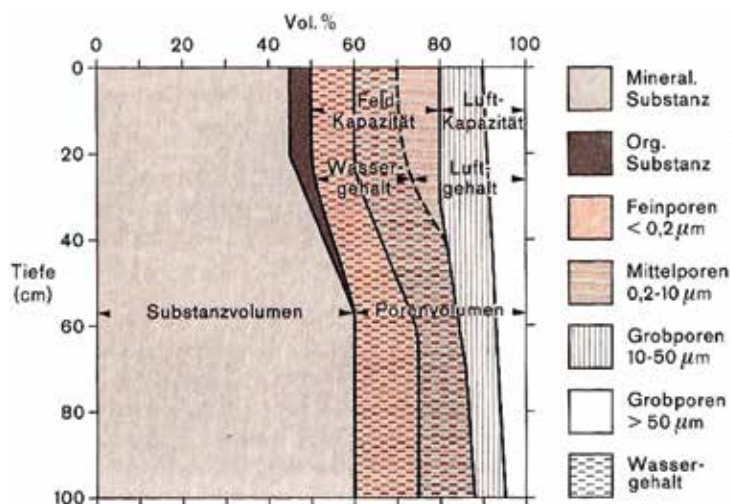
	weite Grobporen	enge Grobporen	Mittelporen	Feinporen
Porengröße	> 50 µm	50-10 µm	10-0,2 µm	< 0,2 µm
verantwortlich für:	Wasserver-sickerung Gasaus-tausch	Wasser-versickerung Wasser-speicherung (Wasser leicht verfügbar)	Wasser-speicherung (Wasser schwer verfügbar)	Totwasser (für Pflanzen nicht verfü-gbar)
Oberboden	+ 57 %	+ 21 %	- 5 %	- 1 %
Pflugsohle	+ 13 %	+ 53 %	- 5 %	- 2 %
Unterboden	+ 2 %	+ 9 %	- 2 %	- 4 %

*Durchschnitt aus vier Standorten und 132 Messreihen

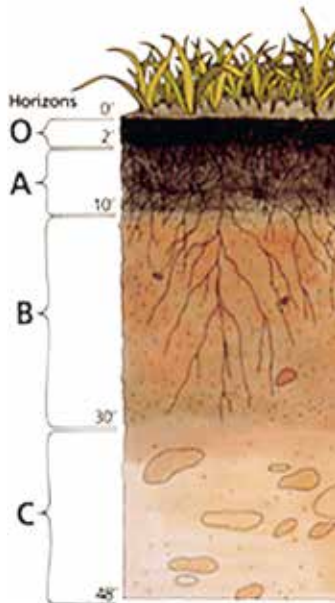
Bodengefüge (Bodenstruktur)

Unter Bodengefüge versteht man die räumliche Anordnung der festen mineralischen und organischen Bodenbestandteile zu den Hohlräumen. Letztere sind entweder mit Wasser oder Luft gefüllt sind. Das Bodengefüge macht den Oberboden erst krümelig. Bei einer guten Bodenstruktur beträgt das Verhältnis der festen Bodenbestandteile zum Porenvolumen jeweils etwa die Hälfte. Das Porenvolumen, also jener Anteil, der nicht von festen Bestandteilen eingenommen wird, ist je nach dem momentanen Wassergehalt des Bodens entweder mit Bodenluft oder mit Bodenwasser gefüllt. Ein ideales Porenvolumen teilt sich auf mind. 10 bis 15 % luftführende Grobporen, 20 bis 25 % wasserführende Mittelporen und max. 10 bis 20 % Feinporen auf. Die Porenverteilung beeinflusst vor allem das Wasserhaltevermögen bzw. die Feldkapazität eines Bodens. Unter **Feldkapazität** (Grenze des Wasserspeichervermögens) versteht man jene Wassermenge, die ein zunächst wassergesättigter Boden gegen die Schwerkraft nach drei bis vier Tagen noch festhalten kann. Sie ist von der Porengrößenverteilung abhängig. Während Grobporen das Wasser nicht bzw. kaum durch Kapillarkräfte festhalten können, ist das Wasser in Feinporen nicht mehr pflanzenverfügbar und wird deshalb auch als **Totwasser** bezeichnet. Jener Teil der Feldkapazität, der von den Pflanzen über die Wurzeln aufgenommen werden kann, wird als nutzbare **Feldkapazität (nFK)** oder auch als Bodenwasservorrat bezeichnet.

Beispiel für Aufteilung des Porenvolumens eines sandigen Lehmbodens



Nach Schröder, Bodenkunde in Stichworten, 1988



Schema Bodenprofil

Quelle
P.B.Univ. Wisconsin

Bodentypen

Unter einem „Bodentyp“ werden Böden zusammengefasst, die in der Entwicklung gleiche bzw. ähnliche Eigenschaften aufweisen. Um Aussagen über Tiefgründigkeit, Bodenart (Bodenschwere) sowie das Muttergestein machen zu können, ist das Ausgraben eines „Bodenprofiles“ erforderlich, dass vereinfacht in drei Bodenhorizonte unterteilt werden kann:

Bodenprofil

Der A-Horizont ist der oberste, durch den Humus dunkel gefärbte, vom Bodenleben am intensivsten belebte und auch am stärksten durchwuzelte Horizont. Er stellt die zu bearbeitende Bodenschicht (Ackerkrume) dar.

Der **B-Horizont** ist der darunterliegende, meist durch Einwaschungvorgänge noch braun gefärbte, aber nur noch schwach durchwuzelte Verwitterungshorizont. In Trockengebieten kommen daher B-Horizonte selten vor.

Der **C-Horizont** gibt Aufschluss über das Muttergestein, welches die Eigenschaften des entstandenen Bodens mitgeprägt hat.

Unsere wichtigsten Bodentypen – Braunerde und Parabraunerde



Braunerde

Häufiger Bodentyp des humiden Klimas, meist auf kalkarmem Ausgangsgestein, Verbraunung und Verlehmung im Untergrund

Braunerden und Schwarzerden zählen zu den fruchtbarsten Böden. Die Gruppe der Braunerden hat aufgrund der einwirkenden Niederschläge einen ausgeprägten braunen B-Horizont im Unterboden. Diese Verbraunung ist meist mit einer Verlehmung, d. h. verstärkter Tonmineralbildung, verbunden. Durch die witterungsbedingte Ausfällung von Eisenoxiden entsteht meist eine porenreiche Bodenstruktur mit großen Krümeln, die gut wasser- und luftdurchlässig sind. Aufgrund der hohen biologischen Aktivität entsteht aus der organischen Substanz meist Mullhumus.

Diese Böden sind vielfach unter natürlichen Laubmischwäldern mit ausreichender Nachlieferung von Basen entstanden. Sie sind bei entsprechender Nährstoffrücklieferung wertvolle Ackerböden, die aber auch durch Versauerungsprozesse infolge von Kahlschlägen, Verheidung oder einseitigen Nadelwaldanbau zu unfruchtbaren Podsolen und Podsol-Pseudogleyen degradieren können.



Parabraunerde

dunkelbraune, humose Parabraunerde, tiefgründig, lehmiger Schluff, gute Durchwurzelung, zahlreiche Wurzelröhren

Parabraunerden sind bei uns ein weit verbreiteter Bodentyp und bei entsprechender Düngung bleiben diese Böden auch lange fruchtbar.

Bei geringer Basenausstattung kann die Parabraunerde versauern, wodurch die sog. „Ton-Schluff-Trennung“ beschleunigt wird, d. h. die Tonfraktion wird aus dem Oberboden in den Unterboden eingewaschen und die wasserableitenden Grobporen werden verengt bzw. verstopfen, was zu einer dauernden Staunässe führen kann, was dann nur noch eine extensivere Grünlandnutzung zulässt. Durch Tiefenlockerung, Drainagierung sowie Kalkung können solche Böden wieder verbessert werden.

Podsole, auch Bleicherden oder Grauerden genannt, sind saure, nährstoffarme und damit ertragsarme Böden.

Sie können meist nur als extensive Grünlandstandorte genutzt werden.

Beim Prozess der **Podsolierung** wird durch das Fehlen von Kalk die Bodenstruktur verschlechtert, da die Bodenkrümel nur bei ausreichender Kalkversorgung stabil bleiben. In der Folge werden im Zuge der Versauerung des Oberbodens die Tonminerale zerstört bzw. Eisen und Aluminium langsam mit dem Sickerwasser in den Unterboden verlagert, die dann wiederum für die Bodenbildung fehlen. Infolge der Tonverlagerung werden die groben Poren verstopft, die vorher das Sickerwasser abführten und für den Luftaustausch sorgten.

Die organische Substanz wird aufgrund der Versauerung als Rohhumus an der Bodenoberfläche angereichert.

Podsole entstehen auch durch den Fichtenanbau über mehrere Generationen.

Bodentypen in Österreich

Bei den in Österreich vorkommenden Böden unterscheidet man zwischen Böden im Grundwassereinflussbereich wie Moore, Anmoore, Auenböden und Gleye und Böden ohne Grundwassereinfluss wie Schwarzerden, Braunerden bzw. Parabraunerden, Rendsinen, Ranker, Pseudogleye, Pelosole und Podsole.



Bodenprofil Podsol

Bodentypen im Grundwasserbereich

Moore (Niedermoore und Hochmoore)
Anmoore
Auböden
Gleye

Bodentypen außerhalb des Grundwasserbereichs

Braunerden, Parabraunerden
Schwarzerden
Pseudogleye
Rendsinen
Ranker
Pelosole und Podsole

Böden im Grundwasserbereich

Moore sind aus abgestorbenen Pflanzen entstanden, die durch Sauerstoffmangel infolge von Wasserüberschuss nicht abgebaut werden konnten und so zu Torf wurden.

Anmoore sind sehr humusreiche Böden, die unter feuchten Bedingungen entstanden, oft auch vergleyt sind und häufig eine ungünstige Bodenstruktur aufweisen. Sie können sowohl kalkhaltig als auch kalkfrei sein.

Auenböden stehen mit dem fließenden Grundwasser in Verbindung und sind aus Schwemmmaterial entstanden.

Gleye sind Mineralböden, die durch hochstehendes und nur sehr langsam ziehendes Grundwasser entstanden sind. Infolge von zeitweisem Sauerstoffmangel infolge des schwankenden Grundwasserspiegels entstanden vernässte, hell- bis blaugraue Horizonte. Sie neigen zur Verdichtung und sind kalte, meist schlecht durchwurzelbare Böden.

Pseudogleye sind Böden mit einem Staukörper im Unterboden, der das Sickerwasser nicht bzw. nur schwer durchlässt. Dieser Staukörper kann von Natur aus vorhanden sein oder sich durch Toneinschlammung allmählich gebildet haben. Bei stärkeren Niederschlägen vernässen diese Böden, während bei Trockenheit (wegen des Staukörpers) kein Grundwasser aufsteigen kann. Im Zuge dieser Wechselfeuchtigkeit entstehen Verfärbungen und Marmorierungen des Bodenmaterials. Luftmangel und schlechte Durchwurzelung sind die Folge.

Böden außerhalb des Grundwasserbereichs

Schwarzerden (auch Tschernoseme genannt) sind tiefgründige und sehr fruchtbare Böden aus feinem Lockermaterial (Löß, Sand, Tegel). Sie sind mit Ausnahme der Gebirgsschwarzerden im Trockengebiet entstanden und besonders wertvolle Ackerböden.

Braunerden haben einen durch Einwaschung von Humus bedingten braunen B-Horizont im Unterboden, der sich deutlich vom Mutterboden unterscheidet. Sie sind weit verbreitet und zählen zu den fruchtbarsten Böden.

Parabraunerden sind ebenfalls weit verbreitet und zählen bei entsprechender Kalkung ebenso zu den fruchtbarsten Bodentypen.

Rendsinen entstehen über Kalkgestein und haben einen ausgeprägten, dunklen A-Humushorizont. Ein typischer B-Horizont (Verwitterungshorizont) fehlt meist. Sie sind daher seichtgründig und austrocknungsgefährdet.

Ranker entstehen im Gegensatz zum Rendsinen unter kalkfreiem Ausgangsmaterial (Silikategestein). Der Ranker neigt dadurch zur Versauerung.

Podsole sind meist unter Nadelwald entstanden. Sie sind meist nährstoffarme Böden mit niedrigem pH-Wert, die infolge von Versauerung und Tonverlagerung (Podsolierung) oft wasserundurchlässig sind.

Pelosole entstehen unter tonreichem Ausgangsmaterial und sind durch den hohen Tonanteil wechsellockere und schwer zu bearbeitende Ackerböden. Sie quellen und schrumpfen und können bei Trockenheit tiefe Risse bilden, die sich bei Nässe wieder schließen. Es kommt zu ständigen Scherbewegungen, wodurch sich glänzende Scherflächen und ein ausgeprägtes, scharfkantiges Bodengefüge bilden.

Rohböden sind vom Profil her noch unreife Böden auf festem Gestein oder Gesteinsschutt.



Ranker



Verbraunte Pararendsina



Entwässerter, kalkfr. Gley



Kalkhaltige
Lockersedimentbraunerde



Kalkfreie
Lockersedimentbraunerde



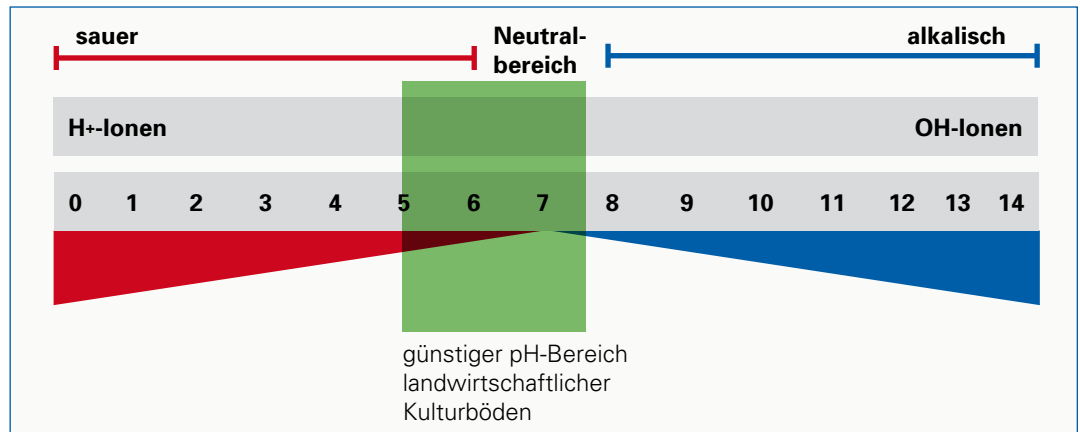
Kalkfreier anmooriger Gley

Fotos (6) Wieshammer

pH-Wert – Leitparameter für die Bodenfruchtbarkeit

Der pH-Wert ist allgemein ein Maßstab für die saure oder basische Wirkung einer wässrigen Lösung, wobei pH 7 einer neutralen, pH < 7 einer sauren und pH > 7 einer alkalischen Lösung (basischen Laugenwirkung) entspricht.

Der Begriff pH leitet sich vom lateinischen „**potentia hydrogenium**“, d. h. Kraft des Wasserstoffes, ab.



pH Skala – Maßstab zur Beurteilung der Bodenreaktion

Der pH-Wert der Bodenlösung wird bestimmt vom Verhältnis der sauren Wasserstoff (H⁺-Ionen) zu den alkalischen Hydroxid (OH⁻-Ionen). Je geringer die pH-Zahl, umso mehr Wasserstoffionen sind im Wasser und umso saurer ist das Wasser. Neutrales Wasser hat bei 25 °C einen pH-Wert von 7. Er kann sich auch alleine durch die Temperatur über das Kohlensäure-Gleichgewicht verändern.

Die pH-Zahl gibt über die H-Ionenkonzentration den Säuregehalt in einer wässrigen Lösung an. Je niedriger die pH-Zahl, desto stärker die vorhandene Säure. Die Skala ist so abgestuft, dass pro Abnahme um eine pH-Stufe die Säurestärke um den Faktor 10 zunimmt. Der pH-Wert drückt somit den negativen dekadischen Logarithmus (= Zehnerlogarithmus) der Wasserstoffionenkonzentration aus. Das bedeutet, dass eine Bodenlösung mit einem pH-Wert 4 um 10-mal saurer ist als ein Boden mit einem pH-Wert von 5 oder um 100-mal saurer ist als bei einem pH-Wert von 6 bzw. 1000-mal saurer ist als bei einem pH-Wert von 7.

pH-Werte einiger Stoffe			
Salzsäure 3,5 %	pH 0	Mineralwasser	pH 6
Magensäure	pH 2	reines Wasser	pH 7
Zitronensaft	pH 2	Waschmittellösung	pH 10
Wein	pH 4	Natronlauge 3 %	pH 14

pH-Wert beeinflusst Bodeneigenschaften

Der pH-Wert im Boden ist ein Maßstab für den Säure- bzw. Basengehalt des Bodens. Er wird durch natürliche Puffersysteme beeinflusst und mittels einer Salzlösung von neutraler Reaktion (Calciumchlorid oder Kaliumchlorid) elektrometrisch gemessen. Dabei

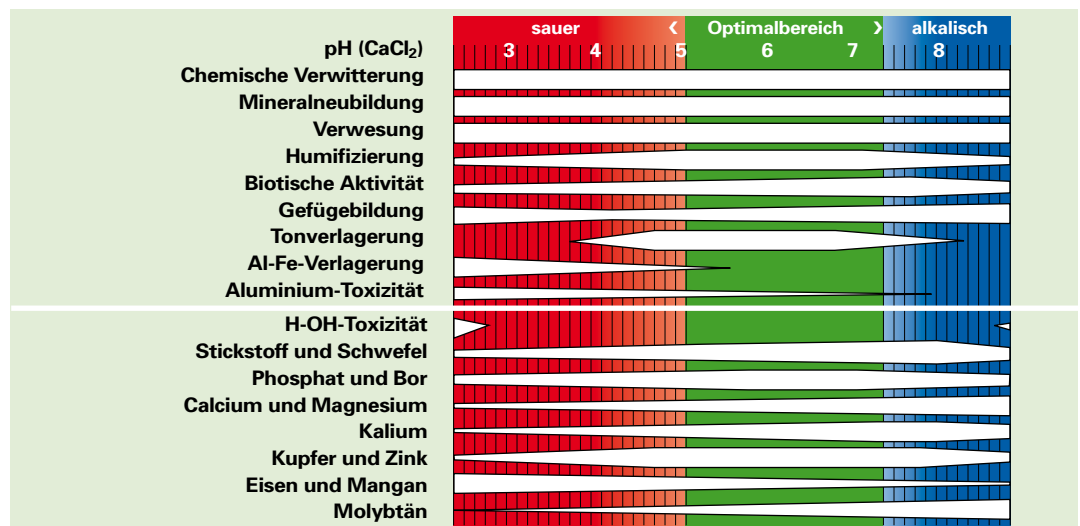
verdrängt die Salzlösung (CaCl_2) einen Teil der an den Bodenaustauschern sorbierten H^+ -Ionen in die Bodenlösung (Bodenschnelltestmethoden zur pH-Wertmessung siehe Kapitel Bodenansprache. Bodenprobenahme und Schnelltests).

Der pH-Wert des Bodens wird vom Ausgangsgestein und der Bodenentwicklung, aber auch von der Bewirtschaftung, insbesondere von der Fruchtfolgegestaltung und der Kalkung (Basenzufuhr) beeinflusst.

Der pH-Wert beeinflusst eine Reihe von Bodeneigenschaften. Auch die Verfügbarkeit von Pflanzennährstoffen wird vom pH-Wert bestimmt. Ferner stellen die einzelnen Kulturpflanzen unterschiedliche Ansprüche an den pH-Wert.

Allgemein stellen pH-Werte unter 3 den Grenzbereich für das Pflanzenwachstum dar. Davon sind vor allem schlecht gepufferte (basenarme) Waldböden betroffen (Optimale pH-Bereiche einiger Kulturpflanzen, Seite 22).

Einfluss des pH-Wertes auf ökologische Faktoren und Nährstoffverfügbarkeit(n. Schröder, 1968)



Bodenversauerung kontrollieren

Niedrige pH-Werte von 4 und darunter können in reinen Fichtenwaldböden kritisch sein, weil dadurch der Tonzerfall gefördert wird. Es kommt auch zu einer verstärkten Auswaschung von Eisenverbindungen sowie einer Lösung von für die Pflanzenwurzeln toxischem Aluminium, welches infolge der meist schlechten Humusqualität (unzeretzte Rohhumusaufgabe) des Bodens oft nicht mehr abgepuffert werden kann. Auch ist kaum noch ein Bodenleben (z. B. Regenwürmer) vorhanden.

pH-Wert und Freisetzung von Aluminium

Neben einem Überschuss an sauren Wasserstoff-Ionen (H^+) werden bei saurer Bodenreaktion, beginnend bei pH-Werten unter 5 neben Fe^{++} , Mn^{++} vor allem verstärkt Al^{+++} -Ionen in die Bodenlösung abgegeben, die für die Pflanzenwurzeln schädlich wirken.

Sichtbar werden die Folgen vor allem bei kalkbedürftigen Kulturen wie z. B. der Gerste, die dann Auflaufprobleme zeigen, schlecht bestocken und kaum zum Schossen übergehen wollen. Diese Symptome können bei pH-Schwankungen im Boden nesterweise oder auch großflächig auftreten. Empfindlich reagieren neben der Gerste Raps, Zuckerrüben, Mais und Ackerbohnen, während der Roggen bekanntlich robust ist.

Ein höherer Humusgehalt im Boden sowie eine Kalkdüngung können hier regulierend wirken, weil dann die Aluminium-Ionen verstärkt als unlösliches Al-Hydroxyd ausgefällt werden.

Anzustrebende pH-Werte im Boden

Ohne einen standortgerechten pH-Wert können alle anderen Produktionsfaktoren wie Düngung, Bodenbearbeitung etc. nur eingeschränkt wirken. Der anzustrebende pH-Wert im Boden hängt vom Tongehalt (Bodenschwere) und vom Humusgehalt eines Bodens sowie von den Bedürfnissen der anzubauenden Kultur ab.

Schwere Ackerböden benötigen einen höheren pH-Wert als leichtere Ackerböden oder humusreiche Grünlandböden. Diese leiden auch seltener unter Bodenstrukturproblemen. Schwere Tonböden können aufgrund ihrer höheren Sorptionskraft mehr Kalk einbauen und benötigen auch mehr Kalk zur Stabilisierung des Bodengefüges (siehe auch Seite 68–70).

Anzustrebende pH-Werte (gemessen in CaCl₂) in Abhängigkeit von der Bodenschwere (BMLFUW 2006)

Sorptionskraft	(Bodenschwere)	Ackerland	Grünland
2	(leicht < 15 % Ton)	um 5,5	um 5,0*
3	(mittel 15-25 % Ton)	um 6,0	um 5,5
4	(schwer > 25 % Ton)	um 6,5	um 6,0

* Je leichter ein Boden und je höher der Humusgehalt, desto niedriger kann der pH-Wert sein.

Auf organischen Böden (Moorböden) kann ein pH-Wert von 4,5 bis 5 bereits ausreichend sein. Hier genügt zur Stabilisierung des pH-Wertes oft die Rückführung der Wirtschaftsdünger.

Kalkhaltige Niedermoore können aber auch von Natur aus pH-Werte von 6 bis 7 aufweisen.

pH-Schwankungen im Boden

Im Boden kann der pH-Wert witterungs- bzw. bewirtschaftungsbedingt vorübergehend etwas schwanken. Reduktionsvorgänge (z. B. bei Sauerstoffmangel infolge von Staunässe, Bodenverdichtungen) können zu einem pH-Anstieg führen.

Auch kann es unmittelbar nach Ausbringung von Gülle im Zuge der Ammonifikation (Abbau von organisch gebundenem Stickstoff zu Ammonium) vorübergehend zu einem pH-Wert-Anstieg im Boden kommen.

Hingegen können Oxidationsvorgänge (z. B. Ackerung oder Fräsen) infolge von Mineralisationsvorgängen im Boden kurzfristig einen pH-Wert-Abfall bewirken.

Kulturpflanzen – unterschiedliche pH-Ansprüche

Jede Kulturpflanze hat sein individuelles pH-Optimum. Die Mehrheit der Feldfrüchte bevorzugen einen leicht sauren bis neutralen Boden.

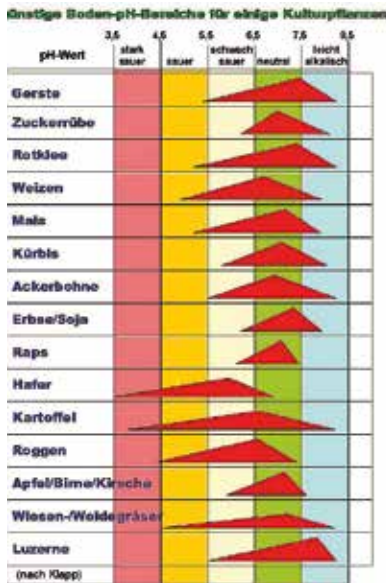
So benötigen z. B. Qualitätsweizen, Gerste sowie Leguminosen einen höheren pH-Wert als Hafer, Roggen oder Kartoffel.

pH-Wert und Feldaufgang



Topfversuch, Feldaufgang bei Gerste in Abhängigkeit vom pH-Wert, 1994

Optimale pH-Werte einiger Kulturpflanzen
(n. Gericke, 1951)

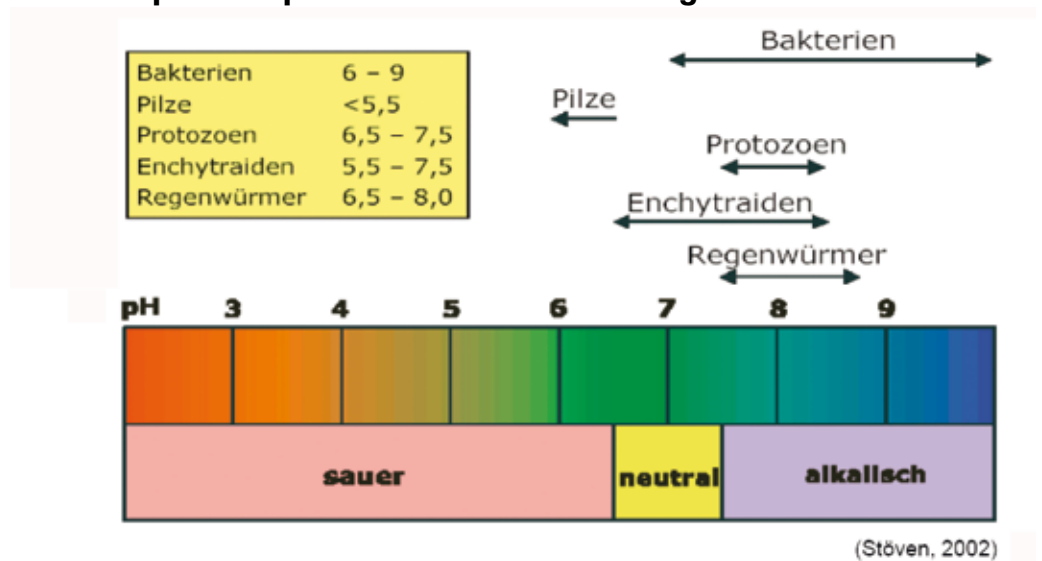


Einige Kulturen (z. B. Kartoffeln) bevorzugen leicht saure, andere wiederum (z. B. Kohl) alkalische Verhältnisse. Der Erreger des Schorfbefalles bei der Kartoffel bevorzugt eine neutrale Bodenreaktion und wird bei pH-Werten ab 5,5 gehemmt.

pH-Wert und Bodenleben

Alle Bodenmikroorganismen bevorzugen für ihre Stoffumsetzungsprozesse sowie die Mineralisation von Nährstoffen, für den Abbau von organischen Ernterückständen sowie den Aufbau wertvoller Humusformen (Mull) pH-Werte im Boden von pH 6 und darüber. Bei pH-Werten unter 5,5 kommt die unerwünschte Pilzflora verstärkt zum Tragen. Auch haben die für die vertikale Bodenbearbeitung wichtigen Regenwürmer ihr pH-Optimum bei pH-Werten über 6.

Optimale pH-Bereiche für Bodenorganismen



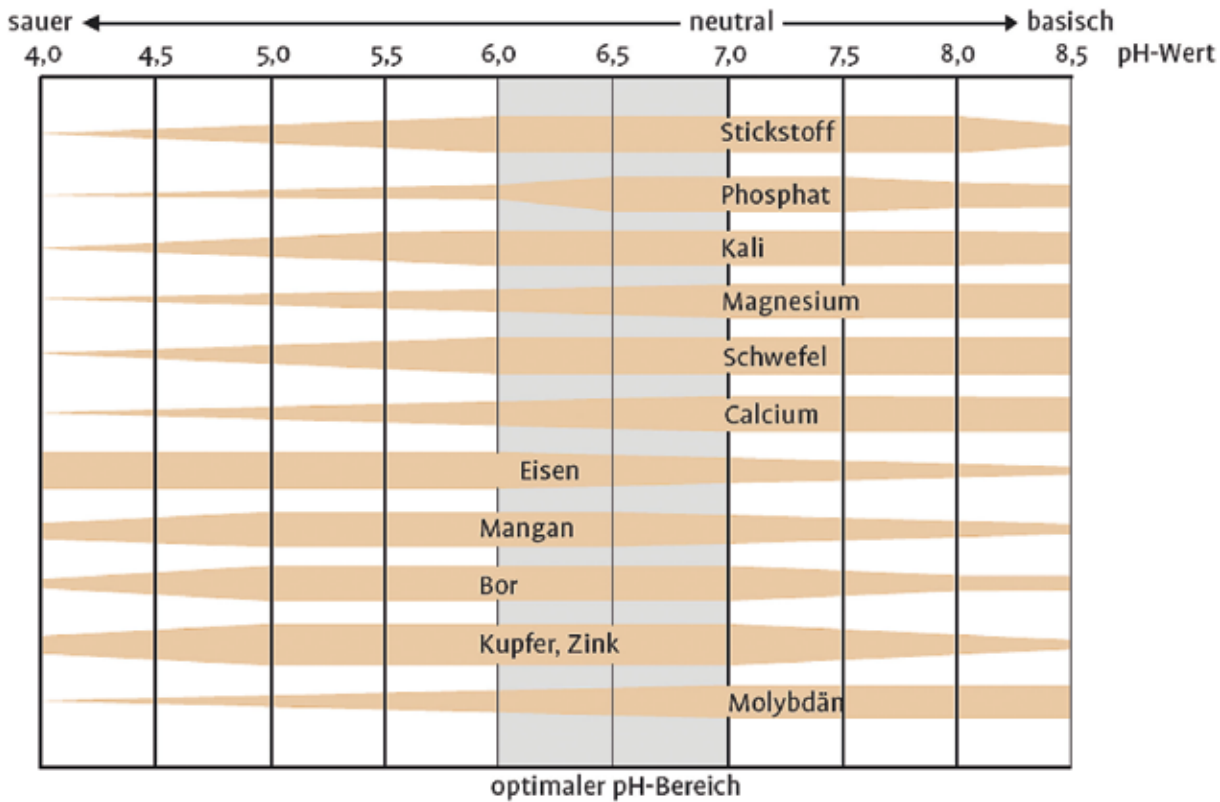
pH-Wert beeinflusst Nährstoffverfügbarkeit

Die Ausnutzung der Pflanzennährstoffe hängt ganz wesentlich vom pH-Wert im Boden ab. Mit sinkendem pH-Wert sinkt auch die Verfügbarkeit der Hauptnährstoffe. So sinkt die N-Ausnutzung bei pH-Werten unter 5,5 um etwa die Hälfte. Ebenso sinkt die Löslichkeit und damit die Abgabe von Phosphat in die Bodenlösung. Der pH-Wert beeinflusst auch den Nährstoffhaushalt der Pflanze. Bei einem pH-Wert von 7 stehen z. B. Ammonium- und Nitrationen im Boden im Gleichgewicht. In sauren Böden überwiegen die Ammonium- und in alkalischen Böden die Nitrationen.

Spurenelemente wie Bor, Kupfer, Zink sind hingegen im leicht sauren Boden besser verfügbar, sind aber mit Ausnahme von Molybdän bis zu einem pH-Wert von knapp 7 für die Pflanzen noch weitgehend verfügbar. Molybdän ist hingegen im alkalischen Bereich besser verfügbar. Es ist Bestandteil des Enzyms „Nitrogenase“, welches ein Schlüsselenzym für alle stickstoffbindenden Mi-

kroorganismen ist. Molybdänmangel kommt häufig bei niedrigen pH-Werten vor. Auch begünstigen hohe Bodengehalte an Eisenoxiden (z. B. auf sauren Podsolen) einen Molybdän-Mangel.

Nährstoffverfügbarkeit in Abhängigkeit vom pH-Wert (SGD, 2006)



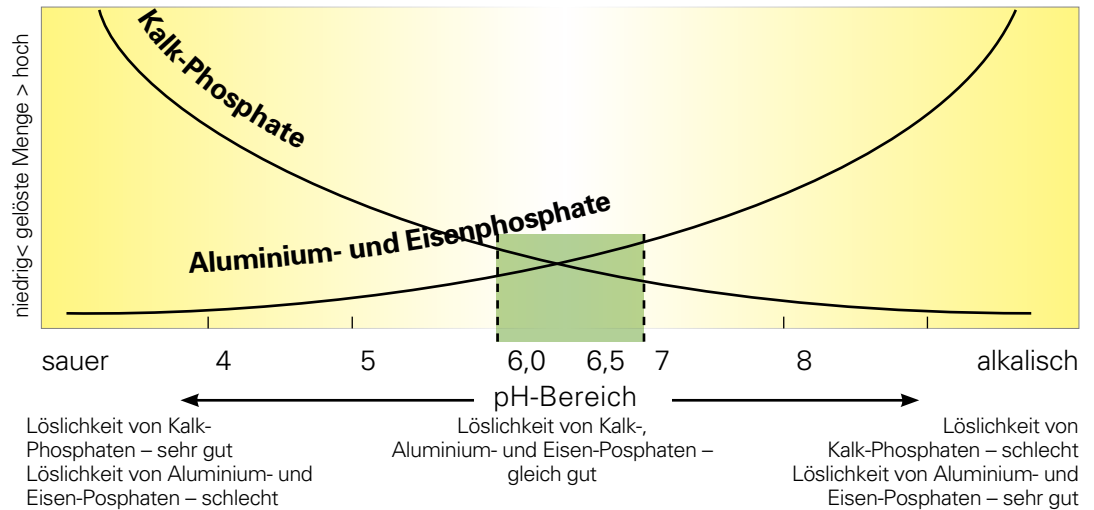
pH-Wert und Phosphatmobilisierung

Normalerweise befinden sich nie mehr als 2 bis 3 kg/ha an gelöstem Phosphat in der Bodenlösung. Dadurch werden sie auch vor Auswaschung geschützt. Bereits bei pH-Werten unter 6 nimmt die Phosphatverfügbarkeit ab.

Phosphate werden entweder im sauren Bereich verstärkt an Aluminium und Eisen bzw. im basischen Bereich an Calcium gebunden. Dementsprechend ist die Löslichkeit von Calciumphosphaten im sauren Bereich besser, während die Verfügbarkeit von Al- und Fe-Phosphaten im alkalischen Bereich besser ist, d. h. durch eine Kalkdüngung kann die Löslichkeit wieder verbessert werden.

Weicherdeige Rohphosphate (Hyperphosphat) sind hingegen nur im leicht sauren Bereich (pH-Werte unter 6,0) gut verfügbar. Die Umwandlung von leicht löslichen Phosphaten zu schwer löslichen Calciumphosphaten (Apatiten) bei hohen pH-Werten verläuft langsamer als die Fixierung (Bindung von Fe- und Al-Phosphaten) auf sauren Böden. Apatite sind im Vergleich zu Fe- und Al-Phosphaten auch wieder leichter löslich.

pH-Wert beeinflusst Phosphatbindung (nach Fink, 1992)



Phosphatbindung im Boden

Der Anteil an leicht löslichem, d. h. direkt pflanzenverfügbarem Phosphat in der Bodenlösung ist mit 2 bis 3 % unabhängig vom pH-Wert des Bodens relativ gering (Schutz vor Auswaschung). Bezüglich der Bindung steigt mit abnehmendem pH-Wert der Anteil an Fe- und Al-Phosphaten an, während im zunehmenden pH-Wert (speziell im alkalischen Bereich) die Bildung von Ca-Phosphaten (Apatiten) stark zunimmt, wodurch die P-Verfügbarkeit abnimmt.

Ein höherer Humusgehalt im Boden kann bei höheren pH-Werten über die bei der Humusmineralisierung frei werdenden Säuren die P-Verfügbarkeit begünstigen. Ein niedriges Redoxpotential (O_2 -Mangel) kann hingegen eine Mobilisierung und Auswaschung von an Eisenoxiden gebundenen Phosphaten (z. B. saure Hochmoore) bewirken.

Organisch gebundene Phosphate werden dadurch leichter freigesetzt, da diese von Phosphatasen aufgeschlossen werden, die von Pflanzenwurzeln und Mikroorganismen produziert werden.

Bei der Bodenuntersuchung werden vorrangig die mineralisch gebundenen Phosphate erfasst, während die im Humus des Bodens gebundenen Phosphate schlechter erfasst werden. Zum Vergleich ist es wichtig, dass immer dieselbe Untersuchungsmethode verglichen wird. Letztlich entscheidend ist der Gehalt in den Pflanzen.

Mittlere Bodengehalte der wichtigsten P-Fractionen (%)*

(n. Kerschberger und Marks, 1974)

Bodenart	pH-Wert	Bodenphosphatformen**			
		leicht lösl. P	Al-P	Fe-P	Ca-P
Sand	5,5	3	55	25	17
schwach lehmiger Sand	5,6	2	40	40	18
stark lehmiger Sand	5,7	2	35	43	20
sandig schluffiger Lehm	6,2	2	25	25	48
lehmiger Ton bis Ton	7,1	3	20	7	70

*Summe aller vier Fraktionen = 100 %

**Extraktionsmittel: NH_4Cl leicht lösliche P; NH_4F -Al-Phosphate; $NaOH$ -Fe-Phosphate; H_2SO_4 -Ca-Phosphate

Bei einer ammoniumbetonten Ernährung kann der pH-Wert direkt an der Wurzel kurzfristig um bis zu zwei pH-Einheiten niedriger liegen. Dadurch können Ca-Phosphate in eine pflanzenverfügbare Form übergeführt werden.

Standortfaktoren und Nährstoffverfügbarkeit

Die Verfügbarkeit von Nährstoffen im Boden hängt nicht nur vom pH-Wert, sondern auch von den Bodeneigenschaften (Ton- und Humusgehalt, Porenvolumen und Wassersättigung sowie vom Sauerstoffgehalt im Boden) ab.

Ferner können Festlegungen von Nährstoffen sowie synergistische und antagonistische Wirkungen die Pflanzenverfügbarkeit beeinträchtigen.

Einfluss von Standortfaktoren auf die Verfügbarkeit von Spurenelementen (Düngefiel, 2. Auflage)

Standorteigenschaften	Bor	Kupfer	Mangan	Zink
pH > 7	---	---	---	---
pH 5,5	+	+	+	+
Stauässe (O ₂ -Mangel)	+	+	+	
hoher Humusgehalt	++	--	--	--
Trockenheit	---	---	---	---
Bodenverdichtung			++	
hoher P-Gehalt				-

+ verfügbar ++ gut verfügbar - Mangel -- starker Mangel --- sehr starker Mangel

Die Verfügbarkeit aller Spurenelemente nimmt mit Ausnahme von Molybdän mit abnehmendem pH-Wert zu, wobei zwischen pH 5 und 6,5 die Verfügbarkeit sehr gut ist. Bei Bor steigt die Verfügbarkeit mit dem Humusgehalt, während bei Trockenheit die Verfügbarkeit vor allem von Bor stark eingeschränkt ist.

Bei Kupfer, Zink und vor allem bei Mangan steigt hingegen die Verfügbarkeit unter reduzierenden Bedingungen infolge von Sauerstoffmangel vorübergehend an (verdichtete, wechselfeuchte und stauässe Böden), während hohe Humusgehalte, z. B. nach einem Wiesenumbbruch insbesondere bei Kupfer (Urbarmachungskrankheit) die Verfügbarkeit verschlechtern.

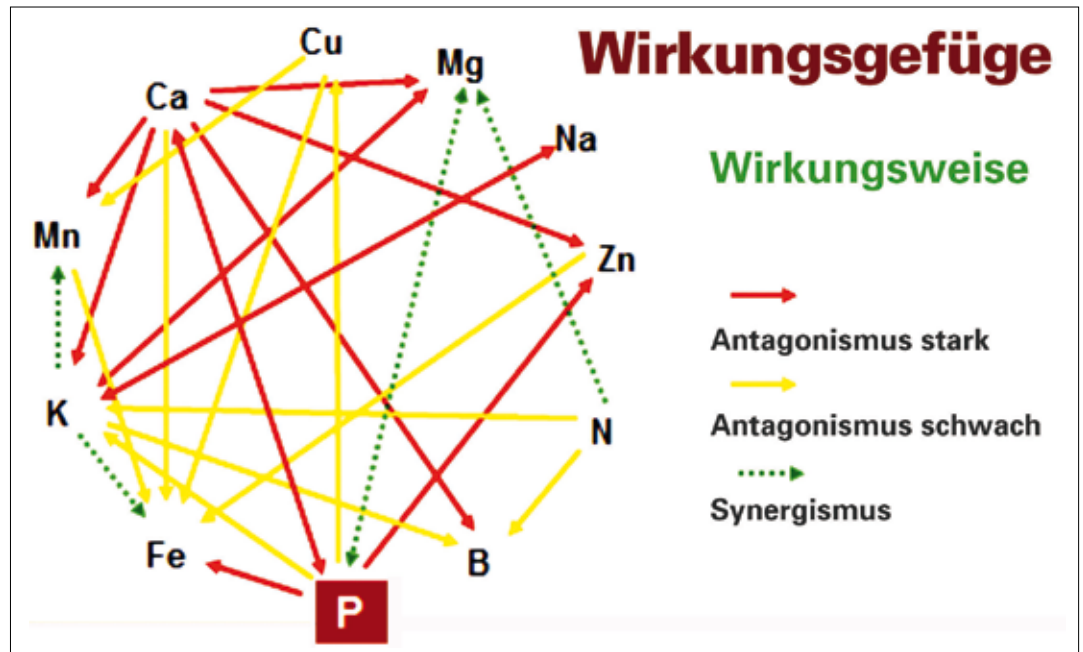
Synergismus und Antagonismus

Neben dem pH-Wert kann auch ein Überschuss an einem Nährstoff die Verdrängung eines anderen Nährstoffes durch Antagonismus bewirken.

Grundsätzlich konkurrieren sich gleichsinnig geladene Ionen (z. B. Ca⁺⁺, Mg⁺⁺, K⁺, NH₄⁺, Na⁺) gegenseitig. Dadurch kann ein stärkerer Überschuss an Kalium einen Mangel an Magnesium bewirken und umgekehrt. Mg ist ferner bei niedrigen pH-Werten schlechter verfügbar als Calcium. Stickstoff kann hingegen als Synergist zu Magnesium die Aufnahme von Magnesium fördern (Synergismus).

Das Kalk-Kali-Gesetz von Ehrenberg besagt, dass z. B. eine einseitig hohe Kalkzufuhr die Kaliumaufnahme herabsetzen und umgekehrt eine sehr hohe Kalidüngung die Ca-Aufnahme der Pflanze vermindern kann, d. h. höhere Kaligaben erfordern auch höhere Kalkgaben. Calcium und Kalium regulieren auch den Quellungszustand in den Zellen (Ca wirkt entquellend und Kalium wirkt quellend). Fehlt aufnehmbares Calcium, so wird das Plasma nicht ausreichend entquellend und die Pflanze kann mit Nährstoffen überschwemmt und damit der Stoffwechsel gestört werden. Ein Mangel an Calcium am Sorptionskomplex kann z. B. zu einer stärkeren Aufnahme von Ammonium und Kalium führen.

Auch wenn zwischen dem Grad der Ca-Sättigung am Sorptionskomplex und dem pH-Wert eine Korrelation besteht, so hängt der Ca-Sättigungsgrad auch von der Bodenart (Bodenschwere) ab. Hier kann im Einzelfall nur die Untersuchung auf austauschbare Kationen eine nähere Aussage treffen (siehe Kationenaustauschkapazität im Kapitel „Puffer- und Speichersysteme im Boden“ auf Seite 30).



SGD, 2003
(Düngung im Weinbau)

Festlegungen

Gegenteilig geladene Ionen können stabile Verbindungen (Festlegungen) eingehen. So kann z. B. ein Überschuss an gelöstem Phosphat (PO_4^-) zu einer Festlegung von Fe und Zn führen.

Puffer- und Speichersysteme im Boden

Was versteht man unter Pufferung

Unter Pufferung versteht man die Kraft eines Bodens Reaktionsveränderungen aufzufangen, die durch eintretende Säuren (H^+) oder auch alkalisierende Basen (OH^-) entstanden sind. Ursachen sind z. B. pH-Veränderungen durch bodeninterne Stoffwechselprozesse, äußere Säureeinträge oder natürliche Auswaschung von basischen Kationen.

Als Puffer im Boden dienen sowohl anorganische als auch organische Verbindungen, die z. B. durch Aufnahme von H^+ -Ionen versuchen den pH-Wert annähernd konstant zu halten. Dabei wirken im Boden in Abhängigkeit vom pH-Wert verschiedene Puffer- bzw. Gleichgewichtssysteme mit unterschiedlicher Pufferkapazität.

Puffersysteme des Bodens (Ulrich, zit. Sauerbeck, 1985)

pH-Wert	Puffersystem		Pufferkapazität*
> 6,2	Carbonat-Puffer	300	kmol H+/% Carbonat *
6,2-5,5	Austauscher-Puffer	25	kmol H+/% Ton
5,5-4,2	Silikat-Puffer	7,5	kmol H+/% Silikat
< 4,2	Aluminium-Puffer	150	kmol H+/% Ton

*300 kmol H+/% bedeutet, dass je % Calcium-Carbonat im Boden (bezogen auf 10 cm Krumentiefe) etwa 300 kg Wasserstoffionen neutralisiert werden können, ohne den pH-Wert zu verändern.

Puffersysteme im Boden

Besitzt ein Boden von Natur aus ausreichend Calcium- bzw. Magnesiumcarbonate, so kommt das „**Carbonat-Puffersystem**“ zur Wirkung. Fehlt das Carbonat im Boden, so erfolgt die Pufferung mit wesentlich geringerer Pufferkraft über den **Austauscher-Pufferbereich**. Dabei werden vor allem die an den Bodenkolloiden (= Sorptionskörper) gebundenen basischen Ca- und Mg-Ionen im sog. Austausch gegen die sauren H-Ionen in der Bodenlösung herangezogen. Ist auch dieser Puffer erschöpft, kommt das wesentlich schwächere „**Silikat-Puffersystem**“ zum Tragen. Dabei werden über die Verwitterung von Silikaten ebenso Basen freigesetzt. Unter pH 4,2 kommt es verstärkt zum Zerfall der Tonminerale, wobei gleichzeitig wurzeltoxische Aluminium-Ionen freigesetzt werden.

Wie puffert Kalk im Boden

Kalk (Calciumcarbonat) kommt in vielen Böden gebunden in Form von Calcium- bzw. Magnesium-Carbonaten vor.

Ist von Natur aus im Boden Calciumcarbonat (CaCO_3) vorhanden, so erfolgt dessen Auflösung u. a. durch die Kohlensäure im Boden. Diese entsteht vorrangig aus dem Kohlendioxid (CO_2), welches nicht nur aus der Atmosphäre, sondern verstärkt durch die Atmung von Bodenlebewesen, Pflanzenwurzeln sowie die Umsetzung von organischer Substanz im Boden entsteht. Je aktiver das Bodenleben, desto stärker ist die Kohlendioxidbildung. Da das CO_2 schwerer ist als Luft, reichert es sich in Bodennähe auf ein Mehrfaches des CO_2 -Gehaltes in der Atmosphäre an. Dies insbesondere bei gestörtem Gasaustausch infolge von Bodenverdichtungen.

Aus dem Kohlendioxid (CO_2) bildet sich in Verbindung mit Wasser Kohlensäure (H_2CO_3), welche dann das Calciumcarbonat (CaCO_3) zum leichter löslichen Calciumhydrogencarbonat $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ auflöst. Man spricht dabei von der sog. „Carbonatverwitterung“.

Carbonat-Pufferung

Verbindet sich die im Boden gebildete Kohlensäure mit z. B. Kohlensaurem Kalk (CaCO_3), so entsteht das Calcium-Hydrogencarbonat (auch Ca-Bicarbonat genannt). Das Hydrogencarbonat (HCO_3^-) dient dann der Pufferung bzw. wird weiter in Verbindung mit Wasser zum löslichen Calciumhydroxid [$\text{Ca}(\text{OH})_2$], welches dann zu Ca^{++} -Ionen und OH-Ionen dissoziiert. Dabei dienen die OH-Ionen (Hydroxyl-Ionen) der Pufferung durch Neutralisation der sauren H^+ -Ionen (Wasserstoff-Ionen) unter Bildung von neutralem Wasser nach der Formel $\text{H}^+ + \text{OH}^- = \text{H}_2\text{O}$ (siehe Abb. Carbonat-Pufferung). Aufgabe der Ca-Ionen im Boden ist hingegen die Verbesserung der Bodenstruktur. Sie tragen ähnlich wie ein Mörtel als Bindeglied zur sog. „Ton-Humus-Komplexbildung“ bei. Calcium ist ferner ein Pflanzennährstoff. Calcium kann auch austauschbar am Sorptionskomplex an Ton und Humusteilchen sorbiert werden.

Aber auch austauschbare Ca^{++} -Ionen können bei einem hohen Ca-Sättigungsgrad an der Bildung von Ca-Hydrogencarbonat $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ in folgender Weise beteiligt sein:
 $(\text{Ca}^{++}\text{-Boden} + 2 \text{H}_2\text{CO}_3 = 2 \text{H}^+\text{-Boden} + \text{Ca}(\text{HCO}_3)_2)$.

Bezüglich der Carbonatpufferung gilt:

Fehlt „freier Kalk“ (Calciumhydrogencarbonat) von Natur aus oder wird er nicht über Kalkung zugeführt, so wirkt die Kohlensäure bodenversauernd und senkt den pH-Wert. Die Kohlensäure dissoziiert dann zu sauren Wasserstoffionen (H^+) und basischem Hydrogencarbonat (HCO_3^-), welches als Anion auswaschungsgefährdet ist und dabei als Schlepper ein Ca^{++} -Ion in den Untergrund mitnehmen kann.

Kalk wird dann als $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ ausgewaschen (siehe Kationenauswaschung im Kapitel „Bodenversauerung hat mehrere Ursachen“).

Erhöht sich hingegen z. B. nach einer Kalkung die Konzentration an puffernden $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ - bzw. **OH-Ionen** im Boden, so werden die Bodensäuren wieder neutralisiert bzw. abgepuffert.

Die Carbonat-Pufferung		
Kohlendioxid CO_2	+ Wasser + H_2O	\rightarrow Kohlensäurebildung $\rightleftharpoons \text{H}_2\text{CO}_3$
Kohlensäure H_2CO_3	\rightleftharpoons dissoziierte Kohlensäure $\rightleftharpoons \text{HCO}_3^-$	\rightarrow Versauerung + $\text{H}^+ \rightarrow$ Säuren
Kohlensäure H_2CO_3	+ Calciumcarbonat + Ca CO_3	\rightarrow Calciumhydrogencarbonat $\rightleftharpoons \text{Ca} (\text{HCO}_3)_2 \rightarrow$ Pufferung
Calciumhydrogencarbonat $\text{Ca} (\text{HCO}_3)_2$	+ H_2O	\rightleftharpoons Calciumhydroxid + Kohlendioxid + Wasser $\rightleftharpoons \text{Ca}(\text{OH})_2 + 2 \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$
Calciumhydroxid $\text{Ca}(\text{OH})_2$	\rightarrow Calcium-Ionen $\rightarrow \text{Ca}^{++}$	+ Hydroxyl-Ionen + $2\text{OH}^- \rightarrow$ Lösung
Hydroxyl-Ionen 2OH^-	+ Säure-Ionen + 2H^+	\rightarrow Wasser $\rightarrow 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow$ Neutralisation

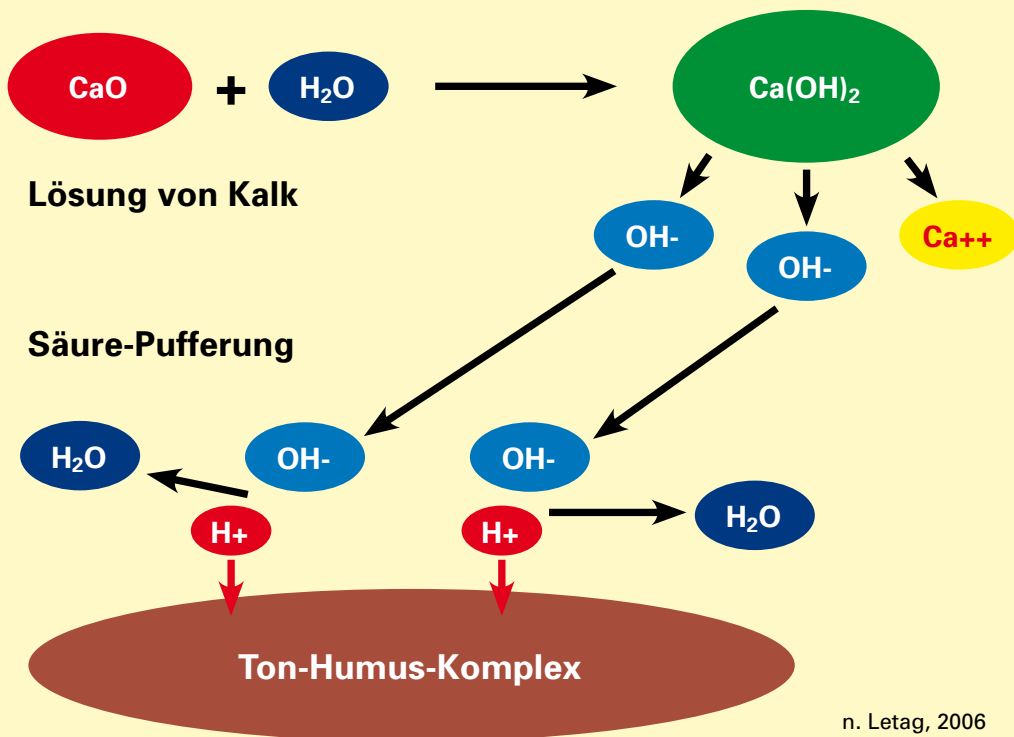
Pufferung mit Branntkalk

Bei einer Düngung mit Branntkalk (CaO) entsteht in Verbindung mit Wasser sofort das Calciumhydroxid $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$, welches auch als Kalkhydrat, Kalkmilch, Carbidkalk oder Kalklauge bezeichnet wird $\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{Ca}(\text{OH})_2$. Das Calciumhydroxid bzw. die frei werdenden Hydrogen-Ionen (OH^-) verbinden sich mit den H^+ -Ionen im Zuge der Pufferung zu neutralem Wasser.

Branntkalk setzt im Vergleich zum Kohlensäuren Kalk schneller Ca^{++} -Ionen frei, d. h. die Reaktionsschwelle für eine rasche Tonflockung und damit Bodenstabilisierung wird rascher erreicht. Bei Düngung mit Kohlensäurem Kalk entsteht zuerst das Calciumhydrogencarbonat, welches später mit Wasser zu Calciumhydroxid weiter zu Ca^{++} und OH^- dissoziieren kann.

Die bei der Pufferung frei werdenden Ca-Ionen dienen der Sättigung der Austauscher mit Calcium am Sorptionskomplex (siehe auch Kapitel „Kationenaustauschkapazität Seite 30).

So wirkt Branntkalk im Boden



Ionenaustauschkapazität (Nährstoffspeichervermögen)

Tonmineralien und Huminstoffe

Sie dienen als Austauscher. Der Ionenaustausch im Boden spielt sich zwischen Tonmineralen (Kationentauscher) und Huminstoffen (dienen sowohl als Kationen- als auch als Anionentauscher) ab. Auf leichteren Böden dominiert der Humus beim Kationenaustausch und auf schwereren Böden die Tonminerale.

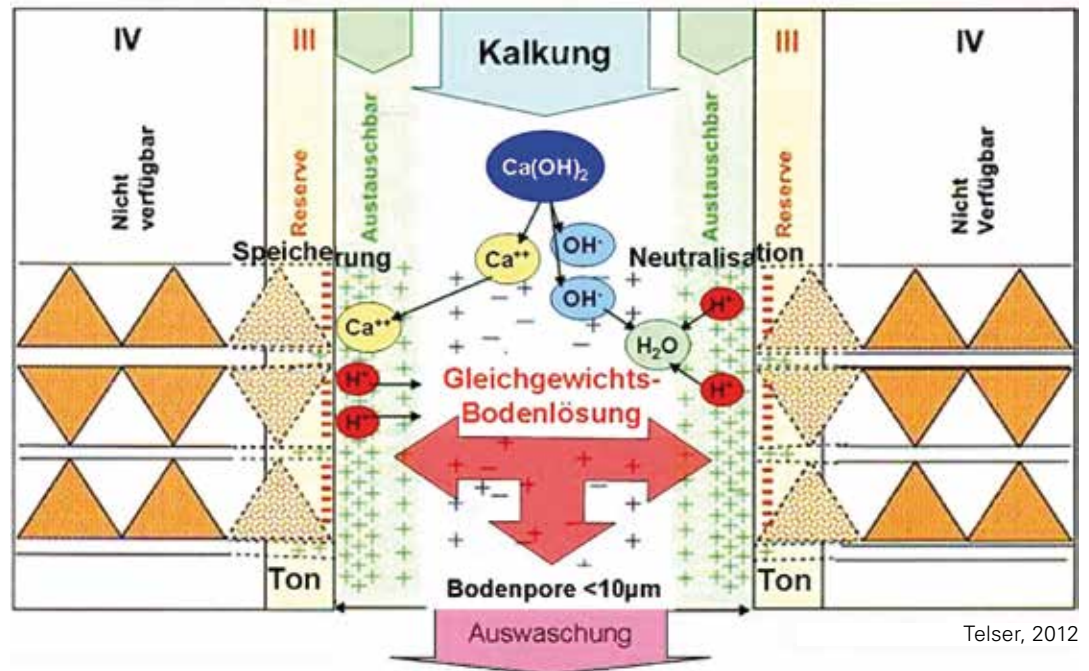
Die **positiv geladenen Kationen** (Ca^{++} , Mg^{++} , K^+ , Na^+) werden von den negativ geladenen Austauschern (Tonminerale, Huminstoffe) wie von einem Magneten festgehalten und gespeichert. Die **negativ geladenen Anionen** (HPO_4^{--} , SiO_3^{--} , SO_4^{--} , NO_3^- , Cl^-) werden hingegen im Boden schwächer gebunden und nehmen bei ihrer Auswaschung ein Kation in den Untergrund mit (siehe auch Anionenauswaschung – Schlepper für Kationen, Seite 34).

Diese Austauschkapazität für Ionen – auch „Sorptionsvermögen“ genannt – ist neben dem pH-Wert und den Redox-Eigenschaften eine wichtige chemische Bodeneigenschaft in Bezug auf Bodengefüge, Bodenfruchtbarkeit und Pflanzenernährung.

Die Kationenaustauschkapazität (KAK) gibt an, wie viele Kationen ein Boden halten kann. Die **Haftfähigkeit** der am Austausch beteiligten Kationen ist vom pH-Wert, der Ladung und Stärke der Hydrathülle in der Reihenfolge $\text{Al}^{+++} > \text{Ca}^{++} > \text{Mg}^{++} > \text{K}^+ > \text{Na}^+$ abhängig.

Die basisch wirksamen Kationen Ca^{++} , Mg^{++} , K^+ , Na^+ sind „austauschbare Basen“, ihr Anteil an der KAK heißt **Basensättigung**. Al^{+++} und H^+ wirken hingegen sauer. Je saurer ein Boden, desto geringer ist die KAK, d. h. desto geringer ist die Verfügbarkeit von Nährstoffen für die Pflanzen.

Schematische Darstellung des Sorptionskomplexes



Kationenaustauschkapazität

Unter der **Kationenaustauschkapazität (KAK, T-Wert)** versteht man die Fähigkeit eines Bodens Kationen austauschbar an der freien Oberfläche von Tonmineralen bzw. der organischen Substanz (Speicherhumus) zu binden und darauf zu speichern.

Sie ist somit ein Maß für die Summe negativer Bindungsplätze an organischen und anorganischen Austauschern im Boden.

Elektrische Teilchen können aufgrund der Oberflächenladung der Bodenbestandteile absorbiert werden. Da die negativ geladenen Ton- und Humusteilchen überwiegen, können die positiv geladenen Kationen gut gespeichert und auch ausgetauscht werden. Dazu gehören Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ und Na^+ als basisch wirkende Kationen und Al^{3+} , Fe^{2+} , Mn^{2+} und Protonen (H^+) als sauer wirkende Kationen. Dabei können Kationen, die vielfach auch Pflanzennährstoffe sind, gegenseitig (z. B. saure H^+ -Ionen) gegen basisch wirkende (Ca^{2+} -Ionen) ausgetauscht werden. Diesen Vorgang nennt man Kationenaustausch.

Ton- und humusreiche Böden haben eine höhere Sorptionskraft und damit Austauschkapazität als z. B. humusarme Sandböden.

Die **potenzielle (maximale) Kationenaustauschkapazität** gibt die max. mögliche Anzahl freier Kationenbindungsplätze bei einem leicht basischen pH-Wert im Boden an.

Die **effektive Kationenaustauschkapazität** gibt den aktuellen Ausnutzungsgrad der potentiellen (theoretisch maximalen) Austauschkapazität, d. h. die tatsächlich freien Kationenbindungsplätze bei dem jeweils aktuellen pH-Wert an, welche mit den positiv geladenen Kationen (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+) als basisch wirkende und den Al^{3+} , Mn^{2+} , Fe^{2+} und der H^+ -Ionen als sauer wirkende Kationen (= potenzielle Säure) belegt sind.

Die effektive KAK ist eine Maßzahl für den Degradierungszustand eines Bodens, wobei unter einem Ausnutzungsgrad von 50 % irreversible Vorgänge (Tonzerfall, Al-Freisetzung) im Boden stattfinden.

Die KAK stellt dadurch auch einen Kennwert für die Bodenschätzung dar, da sie die Nährstoffverfügbarkeit sowie die Filtereigenschaften und damit Auswaschunggefährdung eines Bodens beeinflusst.

Anionenaustauschkapazität (AAK)

Da der Ionentausch sowohl unter positiv geladenen Kationen als auch unter negativ geladenen Anionen (HPO_4^{2-} , SiO_3^{2-} , SO_4^{2-} , NO_3^- , Cl^-) stattfindet, ist vor allem im sauren Bereich auch die Anionenaustauschkapazität (AAK) von Bedeutung. Bei stark versauerten Böden (z. B. Podsolen) oder organischen Böden (Moorböden) sind auch die überschüssigen Anionen mitverantwortlich für die höhere Verfügbarkeit von Fe, Al und Mn.

Im basischen bis leicht sauren pH-Bereich ist die KAK die vorwiegend wirksame Größe. Durch Kalkung und Düngung können die „verbrauchten“ Kationen wieder ersetzt werden. Findet jedoch eine längerfristige Bodenversauerung statt, werden die Austauschverhältnisse verändert und es sinkt die KAK.

Bestimmung

Die Kationenaustauschkapazität (KAK) wird in Centimol Ionenäquivalent pro 1.000 g Boden gemessen und soll zwischen 10 und 40 cmol $+/1.000$ g Boden liegen. Ton- und humusreiche Böden haben eine höhere Austauschkapazität als z. B. humusarme Sandböden. Bei erhöhten Gehalten an sauer wirkenden Kationen (insbesondere Al^{+++}) ist eine Gesundungskalkung erforderlich.

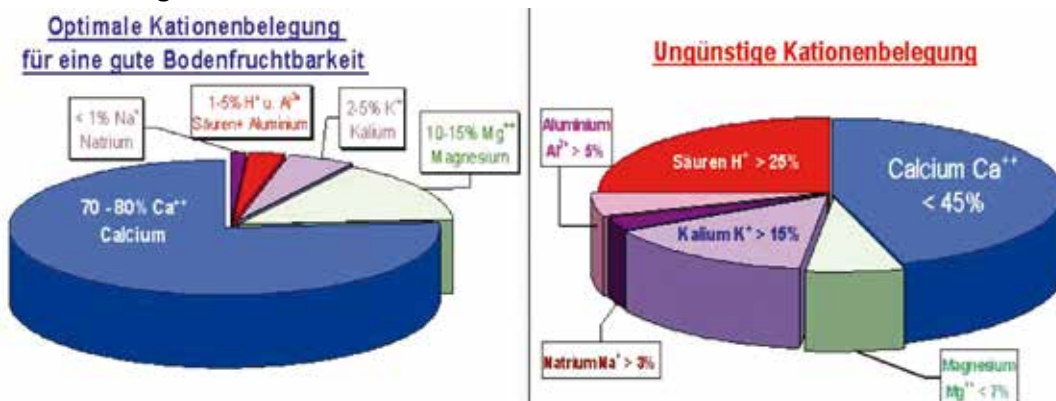
Schätzformel Austauschkapazität

Summe der Kationen (cmol $+/1.000$ g) = Humusgehalt in % $\times 2$ + Tongehalt in % : 2

Kationenbelegung am Sorptionskomplex

Um ein ausgeglichenes Nährstoffangebot und eine gute Bodenstruktur zu gewährleisten, sollte der Sorptionskomplex wie folgt belegt sein: 65 bis 85 % Ca^{++} , 10 bis 15 % Mg^{++} , 2 bis 5 % K^+ und $< 1\%$ Na^+ . Schwere Böden brauchen eine höhere Ca-Sättigung als leichtere Böden.

Anmerkungen:



Calcium-Werte unter 50 % sind oft die Ursache für eine schlechte Bodenstruktur. Steigt der Na-Wert über 5 %, kann es zum „Zerfließen“ des Bodens kommen (z. B. nach dem Winter an Straßenrändern als Folge der Salzstreuung).

Mg-Werte unter 10 % können in Verbindung mit hohen Kaliumwerten zu Magnesiummangel führen. (siehe Kapitel „Bodenstruktur – Stabile Kettenbildung durch Ca + Mg auf Seite 46).

Bei gesunden Böden korreliert der pH-Wert weitgehend mit der Ca-Sättigung am Sorptionskomplex. Er hängt jedoch auch von der Bodenart (Bodenschwere) und dem Humusgehalt ab.

Der pH-Wert alleine liefert noch keine Aussage über die Kationenbelegung bzw. -verteilung. Kationen gelangen durch Gesteinsverwitterung und durch Düngung in den Boden. Die Pflanze selbst entzieht durch die Biomassebildung mehr Kationen als Anionen. Daher wirken höhere Erträge auch stärker versauernd.

Was sagt die Basensättigung (BS-Wert) aus

Sie gibt den Prozentanteil der Austauschplätze gemäß Kationen-Austausch-Kapazität (KAK) an, die mit den Kationen (Ca^{++} + Mg^{++} + Na^+ + K^+) belegt sind. Diese sind auch wichtige Bodennährstoffe. In Mineralböden sind Basensättigungen von 70 bis 80 % optimal.

Ton- und Humusgehalt beeinflussen Austauschkapazität

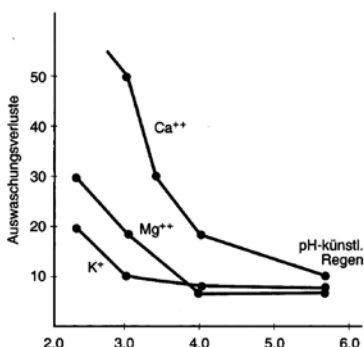
Ca^{++} und Mg^{++} werden relativ stärker an organische Austauscher, K^+ und NH_4^+ hingegen stärker an Tonminerale gebunden. Die KAK bestimmt in Abhängigkeit vom pH-Wert die Sorptionskraft des Bodens. Leichte und humusarme Ackerböden, aber auch Extensivgrünland (saure Almböden) haben eine geringere KAK als schwerere Böden.

Ionenkonkurrenz und Auswaschung

Grundsätzlich können sich Kationen auch untereinander konkurrieren, d. h. ein Überschuss an Kalium oder Calcium kann auch einen Mangel an Magnesium bewirken (siehe auch Synergismus und Antagonismus beeinflussen Nährstoffverfügbarkeit Seite 25).

Das zweiwertige **Magnesium** wird stärker über den Humus gebunden, weshalb es auf humosen Grünlandböden weniger auswaschungsgefährdet ist als auf leichten, humusarmen Ackerböden.

Kationenauswaschung in Abhängigkeit vom pH-Wert
(n. Sauerbeck, 1983)



Ca ist auf sauren Böden mobiler als Mg

Kationenauswaschung – Verlust an Bodenfruchtbarkeit

Die Auswaschung von Kationen steigt mit abnehmendem pH-Wert. Dabei wird Calcium stärker ausgewaschen als Magnesium oder Kalium. Sie hängt aber auch von der Sickerwassermenge ab (Seite 34)

Magnesium ist bei niedrigen pH-Werten schlechter verfügbar als Calcium. Dadurch geht es auch langsamer mit dem Massenfluss in die Bodenlösung über.

Im Vergleich zu Calcium bleibt es dadurch auch länger in der Bodenlösung als die Calcium-Ionen, weshalb es im Vergleich weniger auswaschungsgefährdet ist. Ferner wird es stärker an Humus gebunden.

Eine Mg-Unterversorgung ist daher am ehesten auf bindungsschwachen Sandböden anzutreffen.

In der Bodenlösung soll das Verhältnis Kalium zu Magnesium zwischen 1,7 und 5,1 betragen. Ein Überschuss an Kalium kann ansonsten einen Mangel an Mg bewirken. Liegt das Verhältnis unterhalb dieses Bereiches, können bei kalibedürftigen Kulturen oder bei trockener Witterung auch Kaliummangelsymptome auftreten.

Bodenversauerung – mehrere Ursachen

Was versteht man unter Bodenversauerung

Von einer Bodenversauerung spricht man, wenn von außen oder durch bodeninterne Stoffwechselprozesse, (Sauern Regen, Ammoniumdüngung etc.) mehr saure Protonen (H^+ -Ionen) eingetragen werden, als der Boden neutralisieren kann. Dies ist auch dann der Fall, wenn verstärkt basische Reaktionsprodukte (Ca, Mg) ausgewaschen werden und kein Ausgleich durch eine Erhaltungskalkung erfolgt.

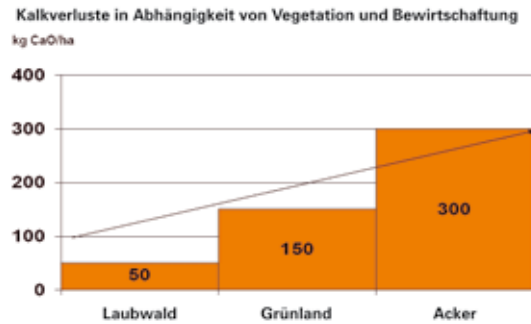
Bodeninterne bzw. natürliche Faktoren der Versauerung

- Aufgrund der Atmung der Pflanzenwurzeln und der Bodenlebewesen entsteht Kohlendioxid (CO_2) bzw. in Verbindung mit Wasser Kohlensäure (H_2CO_3), die als eine wesentliche Protonen-Quelle (H^+) zur Versauerung beiträgt.
- Mit dem Regenwasser (pH-Wert von ca. 5,6) werden laufend Säuren eingetragen und mit dem Sickerwasser in den Unterboden transportiert. In humiden Klimagebieten werden somit durch die höheren Niederschläge (positive Wasserbilanz je nach Standort von 20 bis über 100 mm pro Jahr) auch laufend basische Kationen ausgewaschen.
- Organische Säuren, insbesondere Fulvosäuren, die von den Pflanzenwurzeln ausgeschieden werden oder bei der Humusbildung (Abbau organische Substanz) entstehen, tragen ebenfalls zur Versauerung bei.
- Wird auf eisensulfidhaltigen Böden zweiwertiges Fe_2^+ zu dreiwertigem Fe_3^+ oxidiert, so werden ebenfalls Protonen (H^+) freigesetzt.
- Wenn Pflanzen für ihre Ernährung mehr Kationen als Anionen aufnehmen, geben sie ebenfalls verstärkt H^+ -Ionen ab.
Verrotten Pflanzen im Zuge der Dissimilation (Stoffabbau) vor Ort, vereinen sich Salze und Protonen wieder. Werden aber die Pflanzen durch die Ernteprodukte oder den Holzeinschlag abtransportiert, kommt es durch den Basenentzug zu einer flächenhaften pH-Absenkung.
- Neben natürlichen Einflussfaktoren erfolgt eine Bodenversauerung auch durch das Einbringen bzw. den Abbau organischer Substanz, die Aktivierung des Bodenlebens (CO_2 -Bildung) sowie physiologisch sauer wirkende Düngemittel.
Die Geschwindigkeit der Versauerung wird dabei ganz entscheidend von der Pufferkapazität des Bodens beeinflusst. Ein hoher Carbonatanteil (Ca, Mg) bewirkt, dass sich der pH-Wert auf einem relativ gleichbleibenden Niveau halten kann. Wenn jedoch die Puffersysteme fehlen bzw. verbraucht sind, sinkt der pH-Wert ab.

Fazit: Je nach Basenvorrat des Bodens und Art der Bewirtschaftung müssen saure H^+ -Ionen laufend durch eine Erhaltungskalkung neutralisiert werden.

Basenverluste durch Auswaschung

Nicht zu unterschätzen sind Auswaschungsverluste von basischen Kationen (Ca, Mg). Im **humiden Klima**, wo die Niederschläge höher sind als die Verdunstung, werden die durch die positive Wasserbilanz laufend gelösten basischen Stoffe (Ca, Mg) in tiefere Bodenschichten verfrachtet und mit dem Sickerwasser ausgewaschen. Je niedriger der pH-Wert im Boden, desto höher die Auswaschung. Dadurch versauert die oberste Bodenschicht.



Die Auswaschungsverluste hängen von der Bodenart, der Art der Nutzung, der Fruchtfolgegestaltung und nicht zuletzt von der Höhe der Niederschläge ab.

Bei längeren Brachezeiten („Schwarzer Acker“) werden verstärkt basische Kationen ausgewaschen. Schwere Böden haben durch ihre höhere Sorptionskapazität in der Regel höhere Kalkgehalte, aber damit auch ein höheres Auswaschungspotenzial.

Allgemein sind die Kalkverluste unter Ackerland aufgrund der Bodenbearbeitung immer höher als auf Grünland- oder in Waldböden.

Stärkere Versauerungstendenzen sind vor allem auf sauren Ackerböden mit silikatischem Ausgangsgestein wie z. B. Granit, Gneis anzutreffen.

Im **ariden (trockenen) Klima** können hingegen durch die stärkere Verdunstung auch basische Verwitterungsprodukte aus dem Unterboden wieder in die Krume transportiert werden, wodurch alkalische Salzböden entstehen können.

Jährliche Kalkverluste (kg/ha CaO) durch Auswaschung und Neutralisation

Die Höhe der Auswaschung ist abhängig von der Nährstoffkonzentration, aber auch von der Sickerwassermenge. Die ausgewaschenen Nährstoffe stammen vorrangig aus dem Oberboden, da dort der Vorrat an mobilen Nährstoffen höher ist als im Unterboden.

Bodenartengruppe	Nutzung	Niederschläge		
		niedrig < 600 mm	mittel 600–750 mm	hoch > 750 mm
leicht (S, l'Sand)	Acker	100*–300	400	500
	Grünland	150	250	350
mittel sL bis t'L)	Acker	400	500	600
	Grünland	200	300	400
schwer (tL, T)	Acker Grünland	500	600	700
	Grünland	250	350	450

Quellen | BAD/VLK, 2003; *nach Roschke, 2006

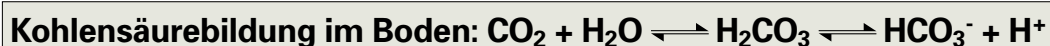
Anionenauswaschung – Schlepper für basische Kationen

Anionen sind negativ geladene Teilchen (Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^-), die im Boden schlechter gebunden werden als Kationen. Ausgewaschen werden vorrangig das Hydrogencarbonat (HCO_3^-),

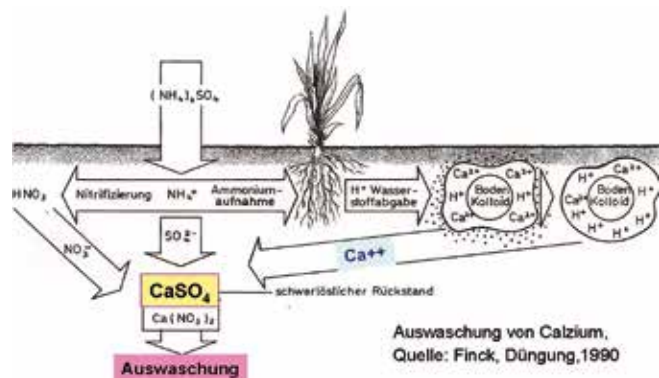
aber auch das Nitrat (NO_3^-), Sulfat (SO_4^-) und das Chlorid (Cl^-). Diese Anionen haben die Eigenschaft bei ihrer Auswaschung stets ein Kation mitzunehmen. Nachdem das Calcium neben Magnesium und Kalium das am meisten vorhandene Kation ist, kann es von den Anionen in den Unterboden bis ins Grundwasser mitgeschleppt werden. Die Auswaschung von Calcium erfolgt als $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ oder als Ca-Sulfat, Ca-Chlorid bzw. Ca-Nitrat.

Der größte Schlepper ist dabei das Hydrogencarbonat (HCO_3^-), welches auf carbonatfreien Böden durch die Auflösung der Kohlensäure zu Hydrogencarbonat (HCO_3^-) und sauren Wasserstoff-Ionen (H^+) entsteht. Letztere führen bei fehlender Erhaltungskalkung auch zur Bodenversauerung.

Gelöstes Ca^{++} fördert den Austausch sowie Auswaschung saurer Kationen (H^+ , Al^{+++}). Es bewirkt so eine Erhöhung der Basensättigung. Das HCO_3^- wirkt als Base und reagiert unter $\text{pH} < 5$ mit dem H^+ -Ion zu H_2CO_3 (Kohlensäure).



Anionenauswaschung – Schlepper für Calcium



Merke: Während andere Nährstoffe durch Auswaschung ohne Nutzen in den Unterboden bzw. ins Grundwasser verlagert werden, hat der Kalk bzw. die Base HCO_3^- nach der Passage des Bodenkörpers seine puffernde Wirkung bereits erfüllt, d. h. im Boden vorhandene Säuren bereits neutralisiert. Ca^{++} als Strukturbildner geht dabei jedoch verloren.

In carbonatfreien Böden ($\text{pH} < 6,2$) verdrängt das H^+ -Ion Ca^{++} vom Austauscher, das mit einem Anion ausgewaschen wird.

Anionen	Kation	wasserlösliche Salze
HCO_3^-		$\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$
Cl^-	$+ \text{Ca}^{++}$	CaCl_2
SO_4^-		CaSO_4
NO_3^-		CaNO_3

Kalkverluste sind eine Folge der Anionenauswaschung.

Aus: Fink, Dünger und Düngung, 1979

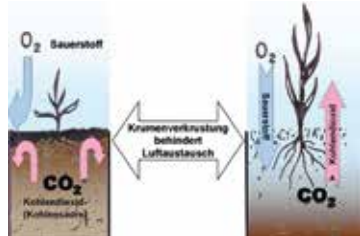
Bodenatmung – natürliche Ursache der Bodenversauerung

Das Entstehen von Säuren (H^+ -Ionen) im Boden erfolgt vorrangig durch natürliche Vorgänge wie z. B. der Bildung von Kohlendioxid (CO_2) im Boden durch die Atmung der Bodenlebewesen und der Pflanzenwurzeln.

Ein Hektar Boden enthält ca. 25 t Mikroorganismen (entspricht ca. 50 GVE/ha). So werden je Hektar Boden jährlich bis zu 20 t CO_2 gebildet. Je höher die Temperatur und aktiver das Bodenleben, desto mehr Kohlendioxid (Pflanzennährstoff für die Assimilation) wird gebildet.

Je mehr CO_2 bzw. Kohlensäure gebildet wird, desto mehr H^+ -Ionen müssen neutralisiert werden. Wenn nicht von Natur aus genügend basenreiches (kalkhaltiges) Bodenmaterial zur Abpufferung zur Verfügung steht, versauert ohne Kalkausgleichsdüngung der Boden.

Auf verschlammten bzw. verkrusteten Böden ist der CO_2 -Austausch mit der Atmosphäre stark reduziert. Dementsprechend steigt der CO_2 -Gehalt in der Bodenluft und damit die Kohlensäurebildung.



Bei Bodenverdichtungen (gestörtem Luftaustausch) kann das CO_2 nicht aus dem Boden und der O_2 nicht in den Boden.

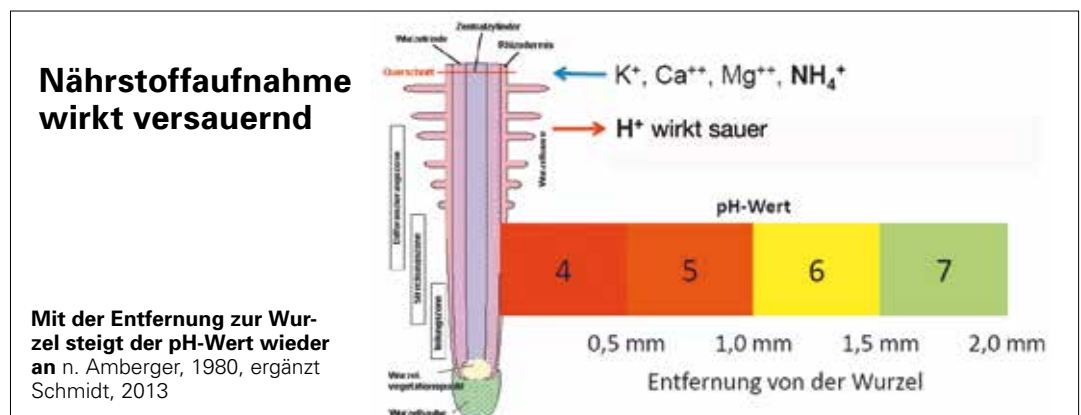
Vergleich Atmosphäre und Bodenluft

	CO_2 Vol-%	pH
Atmosphäre	0,03	5,8
Bodenluft	0,3	5,2
Bodenluft	1,0	5,0
Bodenluft	10	4,5

Mit steigendem CO_2 -Gehalt in der Bodenluft steigt die Kohlensäurebildung, wodurch der pH-Wert sinkt.

Nährstoffaufnahme sowie Nährstoffentzug wirken versauernd

Im Zuge der Nährstoffaufnahme durch die Pflanzen müssen zum Ladungsausgleich stets saure H-Ionen gegen gelöste Kationen (Ca , Mg , K , NH_4) ausgetauscht werden. Wird z. B. von der Pflanze ein Mg^{++} -Ion aufgenommen, werden zum Ausgleich zwei H^+ -Ionen an die Bodenlösung abgegeben, weshalb der Vorgang der Nährstoffaufnahme versauernd wirkt. Aber auch der Nährstoffentzug (Abfuhr basischer Kationen mit dem Erntegut) wirkt versauernd. Die vorübergehende Versauerung am nahen Wurzelbereich mobilisiert Phosphate und Spurenelemente.



Humusbildung belastet Basenhaushalt

Grundsätzlich entsteht aus leicht zersetzbarem organischem Material (Dünger, Ernterückständen, Laub, Rasenschnitt etc.) mit einem engen C/N-Verhältnis vorrangig „Nährhumus“, der dann durch weiteren Ab- und Umbau zu teilweise stabileren „Dauerhumus“ wie Moder, Mull umgewandelt wird. In der letzten Umbaustufe werden die Fulvo- und Huminsäuren gebildet, wodurch saure H^+ -Ionen freigesetzt werden. Bei genügend Basen im Boden bilden sich vermehrt wertvolle Braunhuminsäuren, während auf z. B. kalkfreien Urgesteinsverwitterungsböden mehr unerwünschte Fulvosäuren gebildet werden.

Unter wasserstauenden Schichten können auch Niedermoore bzw. saure Hochmoore mit schwer zersetzbarem Humus (Anmoorhumus, Torf) mit einem weiten C/N-Verhältnis entstehen.

Eigenschaften von Huminsäuren

Werden bei nassen Bodenverhältnissen Ernterückstände eingepflügt, so erfolgt infolge von Sauerstoffmangel kaum ein Abbau der organischen Substanz, wodurch es zu Fäulnisprozessen und Schädigung der Folgekultur kommen kann.

Eigenschaften	Fulvosäuren	Braunhuminsäuren
	Hymatomelans.	Grauhuminsäuren
Bildung	in sauren Böden	in basenreichen Böden
Säurecharakter	stark	schwach
Bindung an Tonminerale	gering	hoch (Ton-Humuskomplexe)
C- Gehalt in %	~45	bis > 60
N-Gehalt in %	0,5–2 (4)	bis 8
Stabilität	gering	hoch
Wasserhaltevermögen	gering	hoch
Sorptionsvermögen (KAK)	gering	hoch
Bodentypen	Podsole saure Braunerden	kalkreiche Braunerden Schwarzerden

n. Kremkus

Die Oxidation von reduzierten Schwefel-, Mangan- und Eisenverbindungen im Boden setzen ebenfalls Säuren (H^+ -Ionen) frei, die zur Bodenversauerung beitragen.

Humusgehalte von Böden

Ackerböden enthalten etwa 1,5 bis 3 % Humus, Grünlandböden 6 bis 8 %, Anmoorböden 15 bis 30 %, Niedermoore bis über 30 % und Hochmoorböden bis nahezu 100 % Humus.

Versauerung durch Mineraldünger

Die Auswahl von Düngemitteln beeinflusst den pH-Wert im Boden: Ammoniumdünger (Ammonsulfat, Diammonphosphat) sowie Harnstoff (Amiddünger) wirken aufgrund der Nitrifikationsvorgänge (Umsetzung von Ammonium- zu Nitratstickstoff im Boden) stärker versauernd. Nitratdünger (Kalksalpeter $Ca(NO_3)_2$, Chilesalpeter $NaNO_3$) sowie Kalkstickstoff wirken hingegen alkalisch. Kalkammonsalpeter (KAS) wirkt leicht versauernd. Rohphosphate (Hyperphosphat) oder auch das frühere Thomasmehl wirken hingegen alkalisch.

Einfluss von Düngemitteln auf den Kalkzustand des Bodens

(Patzke nach Sluijsmans, 1968)

Düngerart	100 kg N bzw. P_2O_5 verbrauchen (-) oder ersetzen (+) kg CaO auf	
	Acker	Grünland
Ammonnitrat-Harnstoff-Lösung (AHL)	-100	-80
Ammonsulfat	-301	-281
Harnstoff	-100	-80
Kalkammonsalpeter (NAC)	-49	-29
Kalkstickstoff	+175	+195
Volldünger 13 : 13 : 21	-102	-82
Volldünger 15 : 15 : 15	-101	-81
Thomasphosphat	+300	+300
Hyperphosphat	+111	+111
Superphosphat	-4	-4
Kalidünger	±0	±0

*Eine Liste der wichtigsten am österreichischen Markt verfügbaren Mineraldünger mit Angabe der Kalkzehrung bzw. Kalkmehrung, ausgedrückt in Reinkalk (CaO), befindet sich im Anhang.

Versauerung durch Immissionen

Eine nicht zu unterschätzende Versauerung waren bis in die 90er-Jahre die Schwefeldioxid-Emissionen aus der Atmosphäre, welche vorwiegend als schwefelige Säuren die Böden belasteten, jedoch im Gegenzug die Schwefeldüngung ersparten. Heute ist die Schwefeldüngung wieder ein Thema geworden.

Warum versauert der Oberboden

Die verschiedenen bodeninternen Prozesse (Boden- und Pflanzenatmung, Ausscheidung von Wurzelsäuren, Nährstoffaufnahme der Pflanzen, Humusbildung im Boden, sauer wirkende Düngemittel, Basenauswaschung etc.) wirken versauernd und müssen laufend durch eine Erhaltungskalkung neutralisiert werden. Versauert der Oberboden, leidet vor allem auf Ackerböden die Bodenstruktur (siehe Seiten 33, 34).

Entnahmetiefe	Versauerung des Oberbodens pH-Wert	
	ohne Kalk	mit Kalk
0-4 cm	4,6	5,6
4-10 cm	5,2	5,3
10-20 cm	5,5	6,3
20-30 cm	6,0	6,3

Quelle: nach Gutser, 1996

*Einer Bodenverdichtung sowie Versauerung des Oberbodens kann durch regelmäßige Kalkgaben von 300 bis 500 kg/ha direkt auf die Krume entgegengewirkt werden. Auf schweren Böden sollten zur rascheren Tonflockung bevorzugt Mischkalke oder Branntkalke verwendet werden. Wichtig ist eine leichte mechanische Einmischung.

Folgen der Bodenversauerung

Die Bodenversauerung verschlechtert die Nährstoffdynamik, hemmt das Bodenleben sowie das Wurzelwachstum, wodurch indirekt auch das Wasserspeichervermögen des Bodens verringert wird.

Bodenversauerung bewirkt:

- Hemmung des Bodenlebens (z. B. Regenwürmer) sowie der Humusbildung
- Verschlechterung der Krümelstabilität (Strukturschäden, Verschlammung)
- Verringerung des Porenvolumens (weniger Wasserspeicherung und Durchlüftung)
- Verstärkte Auswaschung sorptionsgebundener Kationen wie Ca, Mg und Kalium
- Verringerung der Nährstoffverfügbarkeit, vor allem von Molybdän und Phosphor sowie gehemmte Aufnahme von Stickstoff und Magnesium
- Verstärkte Bildung schwer pflanzenlöslicher Fe- und Al-Phosphate sowie verstärkte Freisetzung von Al, Mn, Cu, Zn, Fe und Bor
- Schlechteres Kleewachstum durch verringerte Aktivität der Knöllchenbakterien
- Hemmung der Nitrifikation
- Verringerter Wurzelwachstum und damit Wasserspeichervermögen
- Verstärkte Vernässung (vermehrtes Auftreten von Binsen)

Bodenversauerung hemmt Humusbildung

„Saure Böden“ haben allgemein eine geringere mikrobielle Aktivität und damit einen trägeren Nährstoffumsatz. Die wertvollen Braunhuminsäuren nehmen erst mit steigendem pH-Wert und einem enger werdenden C/N-Verhältnis (Kohlenstoff/Stickstoff) zu.

Bei einem sehr weiten C/N-Verhältnis von ca. 20 : 1 (normal 8 bis 12 : 1) wird aus der organischen Substanz weder Stickstoff aus dem Bodenpool abgegeben noch Stickstoff mikrobiell gebunden.

Auf sauren Böden findet dadurch eine verstärkte Anreicherung schlecht oder gar nicht zersetzter Vegetationsrückstände an der Bodenoberfläche in Form von Roh- oder Auflagehumus statt. Dies ist vor allem auf versauerten Fichtenwaldböden mit oft unzersetzten Streuauflagen zu beobachten.

Einfluss der Kalkzufuhr bzw. des pH-Wertes auf die Humusqualität (n. Kremkus, 1961)

Düngung		pH	Grau-Braunhuminsäureverhältnis
sauer	ohne Kalk	3,9	+ 8,0
sauer	Kalk I	4,5	+ 32,0
sauer	Kalk II	5,6	+ 55,0
neutral	ohne Kalk	4,6	+ 36,0
neutral	Kalk I	5,2	+ 51,0
neutral	Kalk II	6,3	+ 58,0
alkalisch	ohne Kalk	5,7	+ 41,0
alkalisch	Kalk I	6,7	+ 63,0
alkalisch	Kalk II	7,3	+ 71,0

Erst durch Kalkung entsteht ein aktiver Humus mit einem engen C:N-Verhältnis. Eine Kalkung wirkt positiv auf das Bodenleben, die Humusqualität sowie die Bildung von Braunhuminsäuren. Dadurch können wertvolle Dauerhumusformen geschaffen werden.

Bodenversauerung reduziert Wurzelwachstum

Die Bodenversauerung hemmt das Wurzelwachstum, wodurch auch das Nährstoffaufschließungsvermögen verringert wird. Weiters bedeutet ein reduziertes Wurzelwachstum auch eine reduzierte Wasser- und Nährstoffspeicherung.

Kalkmangel fördert Ton-Schluff-Trennung

Fehlt freier Kalk als „Mörtel“, dann kommt es auf schweren Böden (schluffigen Lehm) häufig zur Trennung zwischen Ton und Schluff, wobei die Schluffanteile an der Bodenoberfläche bleiben und sich Schluffkrusten bilden, während die Tonplättchen mit dem Regenwasser nach unten verlagert werden und eine wasserdichte Sperrschicht bilden. Vor allem, wo schwere Maschinen über nicht abgetrocknete Felder rollen, verstärken sich die Probleme. In weiterer Folge kann es zur „Pseudovergleyung“ und letztlich zur Vernässung kommen (siehe auch Kalk fördert Bodenstruktur, Seite 45).

Versauerung fördert Podsolierung

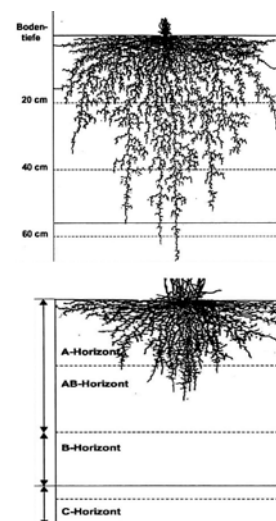
Podsole (Bleicherden) entstehen durch Versauerungsprozesse nicht nur unter Nadelwald. Auch auf Extensivgrünland können die Huminsäuren aus der Rohhumusschicht den pH-Wert bis unter pH 4 absenken. Dadurch können sich Tonminerale auflösen und in den Untergrund verlagern. Auch Eisen und Aluminium werden frei und ausgewaschen. Mit zunehmender Versauerung werden die Tonminerale in den Unterboden (Pflugsohlenbereich) verlagert. Dadurch werden die Grobporen verstopft, die für die Bodenluft (Wurzelatmung) und den Sickerwasserabfluss als natürliche Dränagierung wichtig sind. Die Podsolierung ist quasi eine Folge der Versauerung, wodurch in weiterer Folge auch die Vernässung und Verdichtung des Bodens zunimmt. Solche Böden können dann nur noch als extensive Grünlandstandorte genutzt werden.

Versauerungszustand der Böden in Österreich

In Österreich sind laut Bodenuntersuchung (Boris, UBA, 2004) über 30 % der Ackerböden und etwa 60 % der Grünlandböden als sauer (pH-Werte unter 5,5) einzustufen, d. h. diese Böden bedürfen zur Erhaltung der Bodenfruchtbarkeit einer Gesundungskalkung. Über 45 % aller Grünland- bzw. 35 % aller Ackerböden sind als „kalkfrei“, d. h. carbonatfrei einzustufen.

Nährstoffmangel und Verdichtung hemmen das Wurzelwachstum

Sobotnik 1996

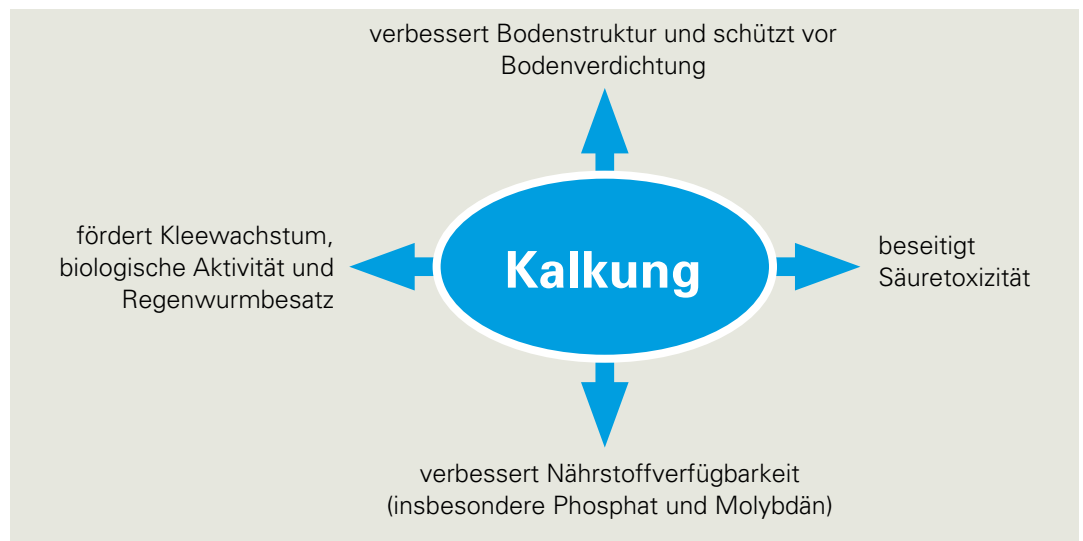


Geringe Wurzelbildung bei Versauerung

Aufgaben der Kalkung

Zu den zentralen Aufgaben der Kalkung zählt vorrangig die Regulierung des pH-Wertes im Boden durch die Abpufferung von Bodensäuren, die Verbesserung der Nährstoffverfügbarkeit, die Förderung der biologischen Aktivität (Bodenleben) und des Leguminosenwachstums.

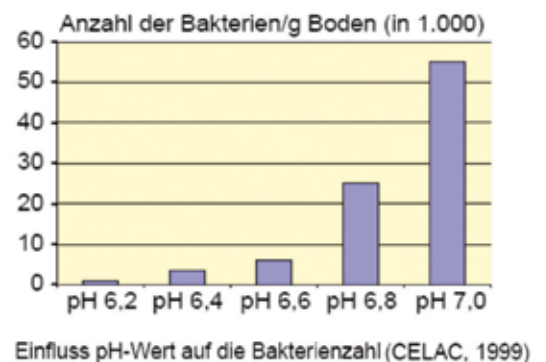
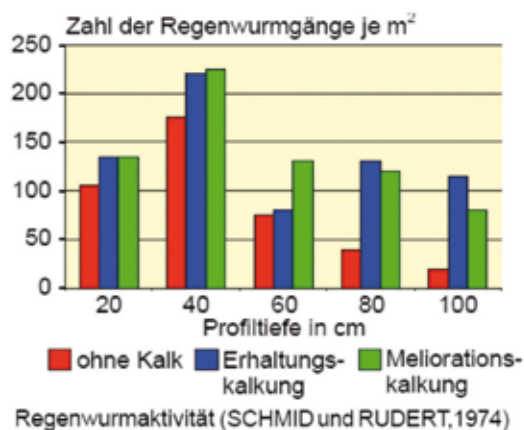
Kalk dient ferner als Bodenverbesserungsmittel, da das Calcium quasi wie ein „Mörtel“ die Ton-Humus-Komplexbildung fördert und damit vor allem auf schweren Böden die Bodenstruktur verbessert. Nicht zuletzt ist Calcium sowie auch Magnesium ein essentieller Pflanzennährstoff.



Neben diesen zentralen Aufgaben hat der Kalk auch noch weitere Einsatzbereiche. Kalk wird ferner zur Desinfektion in Ställen, in Fischteichen, zum Schutz vor Pilzkrankheiten (Kohlhernie, Fußkrankheiten) sowie gegen Schneckenfraß etc. eingesetzt (siehe spezielle Fragen der Kalkdüngung, Seiten 71, 85).

Kalkung fördert das Bodenleben

Kalk fördert die biologischen Umsetzungsprozesse im Boden. Die gesteigerte mikrobielle Tätigkeit führt u. a. zu einer besseren Vernetzung und Verklebung der Bodenkolloide, was sich positiv auf die Stabilität der Bodenkrümel auswirkt.



Einfluss pH-Wert auf die Bakterienzahl (CELAC, 1999)

Auch Regenwürmer sind an der Krümelbildung maßgeblich beteiligt und die entstehenden vertikalen Regenwurmgänge sind unerlässlich für das Porensystem.

25 t Bodenleben je Hektar

Die Bodenorganismen sind nicht nur die Basis für die Nährstoffmineralisation aus Düngemitteln, Ernterückständen und dem Humuspool des Bodens. Sie sind auch wichtig für die Lebendverbauung. Regenwürmer sind vor allem für die Durchmischung der Böden, speziell im Grünland und Wald, wichtig. Die Gesamtmenge der Bodenfauna, auch als „**Edaphon**“ bezeichnet, kann auf einem fruchtbaren Ackerboden bis zu 25.000 kg/ha oder umgerechnet 50 Großvieheinheiten (GVE) betragen.

Allein die Regenwürmer können auf Ackerböden bis zu 1.000 kg, auf Grünland bis über 2.000 kg/ha betragen. Dadurch entsteht eine Bodenumschichtung in vertikaler Richtung von 50 bis 100 t/ha und Jahr. Je höher die Temperatur und je aktiver das Bodenleben, desto mehr Kohlendioxid steht den Pflanzen auch für die Assimilation zur Verfügung. Dies ist in dichten Pflanzenbeständen, z. B. Mais, eine nicht zu unterschätzende CO₂-Düngung über das Blatt (lt. Schönberger, 1990).



Regenwürmer verbessern die Bodenstruktur



Vertikalgänge des Lumbricus terrestris (Tauwurm),

Foto Schmidt, 2010

Nur im gut mit Kalk versorgten Boden findet das Bodenleben optimale Lebensbedingungen. Dort kann es sich rasch vermehren und die organische Substanz in wertvollen Dauerhumus umbauen. Auf versauerten Böden ist dagegen die Mikrobentätigkeit deutlich reduziert. Dies kann dazu führen, dass sowohl die Strohrotte als auch der Abbau organischer Dünger gehemmt sind.

Ebenso sind Mulchsaatverfahren bei großen Strohmenngen darauf angewiesen, dass sich der pH-Wert im Optimalbereich befindet, da sonst Auflaufschäden durch noch nicht zersetztes Stroh auftreten können. Bei pH-Werten unter pH 5,5 erfolgt keine Bildung von wertvollen Humusformen mehr.

Regenwürmer verbessern Bodenstruktur

Während der „**Rotwurm**“ in der oberen Streuschicht lebt und durch den Abbau von Pflanzenresten die Bildung einer verstärkten Rohhumusaufgabe verhindert, verbessert der grau bis blau-rosa färbige „**Wiesenwurm**“ die Bodenstruktur. Er kommt im Grünland bis zu einer Tiefe von 40 cm vor. Der „**Tauwurm**“ geht noch tiefer und kann auch vertikale Gänge graben und somit verdichtete Bodenschichten durchbohren und damit den Regenwasserabfluss verbessern.

Arten und Gewicht an Bodenleben in der obersten Bodenschicht

Microflora	Anzahl je g	Lebendgewicht (kg/ha)
Bakterien	600.000.000	10.000
Pilze	400.000	10.000
Algen	100.000	140
Microfauna je 1.000 cm ³		
Rhizopoden		
Flagellaten	1.500.000	370
Ciliaten		
Metazoenfauna		
Nematoden	50.000	50
Springschwänze	200	6
Milben	150	4
Enchytraeiden	20	15
Tausendfüßler	14	50
Insekten, Käfer	6	17
Mollusken	5	40
Regenwürmer	2	4.000
Gesamt		~ 25.000

optimale pH-Bereiche

Bakterien	6,0 – 9,0
Pilze	< 5,5
Einzeller	6,5 – 7,5
Ringelwürmer	5,5 – 7,5
Regenwürmer	6,5 – 8,0

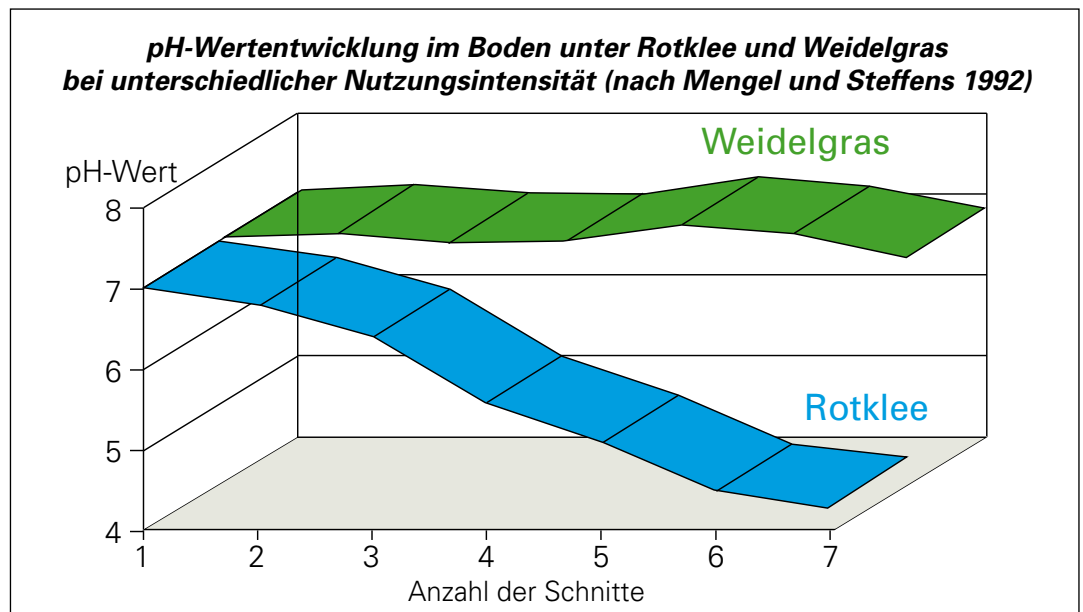
n. Stöven 2002

Kalkung fördert Leguminosen

Leguminosen haben u.a. einen höheren Kalkanspruch als Gräser. Die Molybdänverfügbarkeit im Boden (benötigen die Knöllchenbakterien zur Luftstickstoffbindung) steigt mit zunehmendem pH-Wert an. Dies ist der Grund, warum eine Kalkung die Leguminosen fördert. Unter pH 5 ist das Kleewachstum stark eingeschränkt.

Leguminosen wirken jedoch stärker bodenversauernd als Gräser, weil infolge der Luftstickstoffbindung die Pflanzen den Stickstoff bevorzugt in Form von Ammonium (NH_4^+) binden. Ammoniumdünger wirken im Zuge der Nährstoffaufnahme der Pflanzen stärker versauernd.

Leguminosen haben ein dreimal höheres Ca-Anreicherungsvermögen als Gräser und entziehen dem Boden dadurch auch mehr basische Kationen.



Calcium und Magnesium – essentielle Pflanzennährstoffe

Die Calciumversorgung der Pflanzen ist meist gewährleistet. Ein Mangel tritt mit Ausnahme von intensiveren Obst- und Gemüsekulturen jedoch kaum auf.

Bei Obst und Gemüse spielt freies Calcium eine größere Rolle als bei den übrigen Kulturen. Einerseits dient das Calcium dazu den Boden krümelig und damit frei von Verkrustungen zu halten, andererseits haben Spezialkulturen einen höheren Bedarf an frei verfügbarem Calcium als Pflanzennährstoff.

Die Menge an verfügbarem Calcium korreliert nicht immer mit dem pH-Wert des Bodens, da es auch von der An- und Abwesenheit von Antagonisten (K, Mg, NH_4 , Al) abhängt.

Calcium trägt zur Stabilität der Zellmembranen bei und ist über eine Reihe von Enzymen an Reifungsprozessen beteiligt.

Bei einem Ca-Mangel reifen die Früchte früher, der Chlorophyllabbau (Gelbwerden der Früchte) wird beschleunigt und es leidet auch die Festigkeit des Fruchtfleisches, wodurch die Fäulnisanfälligkeit steigt.

Nährstoffverhältnisse beachten

Relevant ist vor allem das Verhältnis K/Ca und N/Ca in den Früchten. Bei Äpfeln sollte der Ca-Gehalt in der Frucht bei 5,5 mg/100 g Frischsubstanz liegen, wobei Werte unter 3,5 g als kritisch gelten.

Das K/Ca-Verhältnis sollte < 20 sein, wobei Werte über 30 als kritisch gelten.
Das N/Ca-Verhältnis sollte < 10 sein (kritisch sind Werte über 20).

Düngung von Calcium

Neben einer regelmäßigen Erhaltungskalkung, Einschränkung sauer wirkender Düngemittel oder Zusatzbewässerung können verschiedene Düngemaßnahmen wie Branntkalk, Gips (auch wasserlöslich) und Blattdünger helfen, die Ca-Versorgung zu verbessern.

Bei zu intensiverer Bewässerung kann sich der Kalk rasch in tiefere Schichten verlagern, weshalb bei jeder Gemüseauspflanzung (speziell bei Salat) vorsorglich eine Düngung mit Branntkalk, Löschkalk oder mit feinkörnigem Kalkkorn erfolgen sollte.

Auf Carbonatböden mit pH-Werten über 7,5 kann es auch indirekt zu einem Ca^{++} -Mangel kommen, weil dort freies Calcium rasch zu schwer löslichem Calciumcarbonat gebunden bzw. festgelegt wird. Speziell im Gemüsebau ist dann oft die Calciumversorgung nicht mehr gewährleistet.

Zur Abklärung kann neben dem „Kalktest“ auch eine Bodenuntersuchung auf wasserlösliches Calcium sinnvoll sein.

Obstkulturen sollten grundsätzlich höhere pH-Werte (über 6) haben und einen Mindestgehalt an freiem CaCO_3 von 1 % (siehe Kalktest) aufweisen.

Bei hohen pH-Werten im Böden, aber gleichzeitig geringer Ca-Belegung am Sorptionskomplex kann Gips (CaSO_4) als leicht lösliches Calcium die Versorgung verbessern, ohne den Boden-pH-Wert zusätzlich zu erhöhen.

Als **Feuerwehrmaßnahme** sind speziell chloridhaltige Calcium-Blattdünger, die sich schon bei 30 % Luftfeuchtigkeit verflüssigen, aber auch Ca-Nitrat bzw. Ca-Formiat (gut pflanzenverträglich) zur Düngung geeignet.



Infolge von Ca-Mangel verursachte Randnekrosen an jüngeren Salatblättern („Innenbrand“) Foto: Gauk, 2010



Calcium-Mangel – Stängelweiche bei Sonnenblume (Scherer, 2006)

Calcium wird in Abhängigkeit vom Ca-Gehalt in der Bodenlösung und dem pH-Wert im Boden ausschließlich als Ca^{++} aufgenommen und kann bei Bedarf mit dem Transpirationsstrom im Xylem in die oberirdischen Pflanzenteile verlagert werden. Eine Rückverlagerung des Ca^{++} aus älteren Blättern in jüngere Pflanzenteile oder in die Wurzeln ist dagegen nicht möglich. Ca-Mangel kann zu einem völligen Zusammenbruch des Gewebes führen.

Engpass Zellteilung

Obst- und Gemüsekulturen können zur Zeit der intensiven Zellteilung aufgrund des trägen und schwer beweglichen Ca-Transportes innerhalb der Pflanze unter einem Ca-Mangel (z. B. Stippigkeit der Äpfel) leiden. Bei Äpfeln, Tomaten, Sellerie, Karfiol, Chinakohl etc. findet die Ca-Aufnahme aus dem Boden vorrangig zur Zeit der Zellteilung, beim Apfel etwa ein bis fünf Wochen nach der Blüte statt.

Bei Hemmung der Ca^{++} -Zufuhr aufgrund verringerter Transpiration und erhöhter Wachstumsintensität kann es bei sonst normal gewachsenen Pflanzen zur „Stängelweiche“ bzw. zum „Stängelknicken“ kommen.



Obstplantagenkalkung im Frühjahr vor dem Aufblühen



Obstbaumanstrich mit Kalkmilch als Frostschutz gegen zu frühes Saftziehen im Frühjahr und Schutz vor Flechten und Verpilzung

Magnesium (Mg^{++}) wird im Allgemeinen von der Pflanze in geringeren Mengen aufgenommen als Calcium (Ca^{++}). Ionenkonkurrenz mit verschiedenen Kationen kann die Aufnahme beeinträchtigen. In der Pflanze ist hingegen das Magnesium (Mg^{++}) recht gut beweglich, wodurch es sich grundsätzlich vom Ca^{++} unterscheidet. Die gute Verlagerung in oberirdische Pflanzenteile ist auch der Grund, dass Mg^{++} bei nicht ausreichender Versorgung aus älteren Blättern in jüngere Blätter transportiert wird.

Die zentrale Bedeutung im Stoffwechsel der Pflanze hat das Mg^{++} in der Photosynthese als Baustein des Chlorophylls. Ferner werden zahlreiche Enzyme durch Mg^{++} aktiviert. Obwohl sich Mg-Mangel bei den verschiedenen Pflanzen unterschiedlich äußert, beginnt ein Mangel wegen der guten Mobilität immer bei älteren Blättern. Bei fortschreitendem Mangel erscheinen nur noch die Hauptadern grün. Bei monokotylen Pflanzen kann es entlang der Blattnerve der älteren Blättern zu perlschnurartigen Marmorierungen kommen.



Mg-Mangel bei Sonnenblume
Foto Scherer, 2004



Magnesiummangel bei Mais
Foto: Rühlicke

Kalk – Aufgaben in der Fütterung

Calcium ist der wichtigste Bestandteil der Knochen.

Futterkalke sind fein (0 – 0,09 mm) vermahlene Calcium- oder Calcium-Magnesium-Carbonate und werden meist dem Kraftfutter zugemischt.

Futterkalk-Körnungen der Typen 1 (0,2 bis 0,8 mm) und 2 (0,8 bis 1,6 mm) sind vornehmlich für den Einsatz in der Geflügelhaltung bestimmt.

In letzter Zeit werden immer mehr Futterkalke mit Magnesium in der Tierernährung verwendet. Magnesium fördert den Muskelaufbau und ist ein Antistressmineral.

Aufwandmengen:

Rinder	40 – 180 g/Tier und Tag
Schweine	15 – 80 g/Tier und Tag
Geflügel	8 % der Gesamtration
Schafe	20 – 80 g/Tier und Tag

Kalk und Humus fördern Bodenstruktur

Eine gute Bodenstruktur gehört zu den wichtigsten Bodeneigenschaften. Die Bodenstruktur, auch als Bodengefüge bezeichnet, beschreibt die räumliche Anordnung der festen Bodenbestandteile (Tonteilchen) zu den Hohlräumen, die mit Luft und Wasser gefüllt sind. Entscheidend für die Bodenstruktur (Krümelbildung) ist die Kalk- als auch die Humusversorgung des Bodens.

Bei der Strukturbildung dient das Calcium bzw. Magnesium als Kittsubstanz für eine stabile Krümelbildung. Der Kalk ist deshalb in erster Linie ein Bodendünger und wird deshalb als „*Maurer des Bodens*“ bezeichnet.

Auf schweren sowie verdichteten Böden erfolgt eine Kalkdüngung vorrangig zur Verbesserung der Bodenstruktur. Sie schützt den Boden auch vor Verschlammung und Erosion.

Ton-Humus-Komplex – Calcium bildet die Brücke

Als Ton-Humus-Komplex wird die Aggregatbildung zwischen Humusstoffen und anorganischen Bestandteilen (Tonmineralen) bezeichnet. Die zweiwertigen Ca- bzw. Mg-Ionen bilden die Brücke zwischen Ton und Humus.

Die Verbindung von organischen und mineralischen Stoffen zu wertvollen „Bodenkrümel“ erfolgt über die sogenannte „**Lebendverbauung**“ durch das Bodenleben.

Voraussetzung für die Gefügebildung ist auch eine vorangegangene intensive Durchmischung von Tonmineralen mit der organischen Substanz. Das besorgen u.a. die **Regenwürmer** über ihren Verdauungstrakt. Von großer Bedeutung für das Pflanzenwachstum ist auch die chelatisierende Eigenschaft der Huminstoffe, wodurch die Pflanzennährstoffe besser aufgeschlossen werden. Auch Bakterien und Pilze scheiden Komplexbildner und organische Säuren aus. Dies allerdings nur, solange Sauerstoff im Boden ist, d. h. Bodenverdichtungen wirken infolge von Luftmangel negativ.

Frostgare – nicht nachhaltig

Der physikalische Einfluß der Frostgare (Frostzerfall) wirkt nur in der obersten Bodenschicht. Dadurch werdenvor allem leichtere Sand- und Schluffböden mechanisch gelockert. Diese Böden können kaum Ton-Humus-Komplexe bilden. Bei tonhäftigen Bö-



Schematische Darstellung der Kalkbrückenbildung
(n. Düngekalk-Leitfaden, 1965)

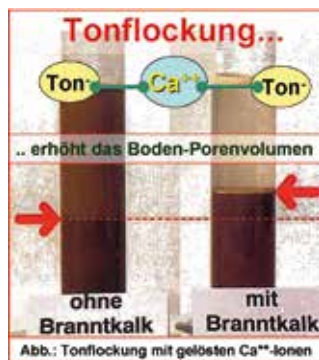
den entstehen physikalische Strukturveränderungen vorrangig durch das Quellen und Schrumpfen von Ton aufgrund wechselnder Bodenfeuchte. Sie sind bei unzureichender Kalkversorgung aber nur von kurzer Dauer, weil sie dann durch Rissbildung und weiteren Bodenzerfall wieder schnell ihre Funktion verlieren (Tonflockung).

Eine übermäßige Bodenbearbeitung kann auch zum Zerfall der Krümelstruktur führen – im Gartenbau wird dieser Kulturfehler als „**Totfräsen**“ eines Bodens bezeichnet.

Tonflockung lockert den Boden

Der Mineralboden besteht aus den Bestandteilen Sand, Schluff und Ton in unterschiedlichen Mischungsverhältnissen (siehe Bodenbestandteile und Bodengefüge Seite 13). Reine Sand- und Schluffböden sind kaum fähig sich selbst zu lockern. Sie verdichten leichter und können nur mechanisch gelockert werden.

Hingegen können bei Böden mit einem höheren Tonanteil über 15 % die Tonminerale den Boden aktiv lockern. Dies geschieht durch Quellen und Schrumpfen bei unterschiedlicher Befeuchtung sowie durch die Ausdehnung des angelagerten Wassers bei der Frostgare, wo Verdichtungen gebrochen und Poren geweitet werden. Eine Kalkung speziell mit Branntkalk bewirkt durch eine verstärkte Tonflockung eine raschere Verbesserung der Krümelstruktur.



Bei der Tonflockung wird durch das gelöste Ca⁺⁺ verstärkt Ton ausgeflockt und abgesetzt. Damit wird das Porenvolumen vergrößert und der Wasser- bzw. Lufthaushalt des Bodens verbessert.

Stabile Kettenbildung durch Calcium und Magnesium

Tonminerale haben eine negativ geladene Oberfläche. Humusteilchen sind zum Teil positiv als auch zum Teil negativ geladen (z. B. Huminsäurereste).

Freie negative Ton-/Humusteilchen können dadurch Kationen (positiv geladene Teilchen) aus der Bodenlösung anziehen.

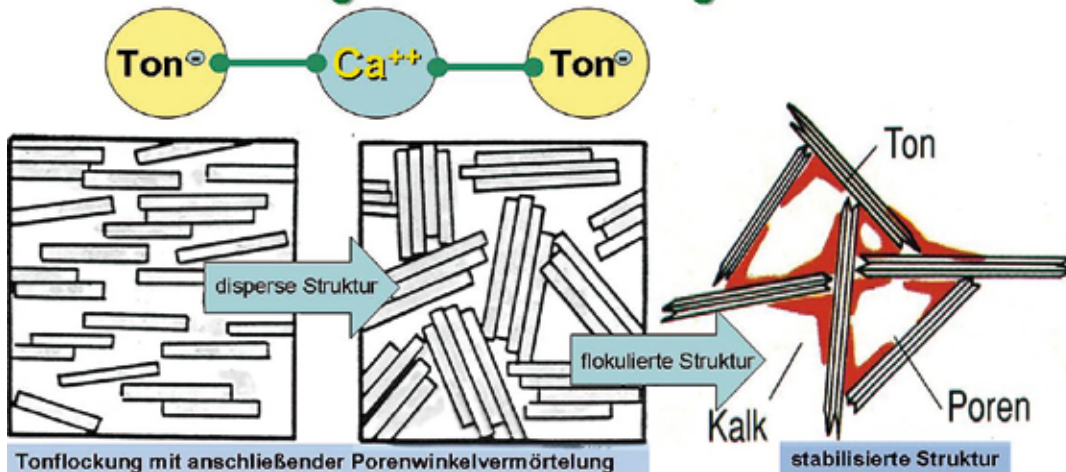
Zweiwertige Kationen (Ca⁺⁺, Mg⁺⁺) können zwei negativ geladene Ton- oder Huminstoffteilchen (siehe Abb. Seite 47) neutralisieren. Dadurch ist mithilfe von zweiwertigen Kationen eine neutralisierende Brückenbildung (Kettenbildung) möglich.

Der so gebildete Ton-Humus-Komplex stabilisiert den Boden gegenüber Erosion und Verschlammung und schafft für die Luft- und Wasserzirkulation ein günstiges Porenvolumen.

Bodenstrukturprobleme können durch Verdichtungen sowie zu geringe Anteile an zweiwertigen Kationen (Ca, Mg) entstehen, wodurch die Böden zur Verschlammung und Verkrustung neigen (siehe auch Ionenaustauschkapazität, Seite 29).

Zu einer Dispergierung kann es auch kommen, wenn sich verstärkt einwertige Kationen wie vor allem Natrium (Salzstreuung) anlagern, da diese nicht wie zweiwertige Kationen Ton und Humus zu stabilen Ketten verbinden können (siehe auch Kationenbelegung, Seite 31).

Kettenbildung durch zweiwertige Kationen



In Extremfällen kann es zu einer Dispergierung kommen.

Dies kann man beobachten, wenn z. B. im Frühjahr große Streusalzmengen (Na^+ -Ionen) auf straßennahe Ackerränder kommen und die Böden dann trotz Frostgare sichtbar verschlämmen.

„Freier Kalk“ bewirkt Porenwinkel-Vermörtelung

Durch die Anlagerung von Calcium-Ionen an die Tonteilchen bildet sich eine lockere Kartenhausstruktur. Der als Flockung bezeichnete Vorgang nimmt mit steigender Calcium-Konzentration in der Bodenlösung zu. Ohne eine ausreichende Ca-Sättigung der Bodenaustauscher von 70 bis 80 % bilden die Tonteilchen nur ein flächig instabiles Kante-Kante-Profil (sog. Kohärentgefüge). In dieser Lagerungsform kleben die Tonteilchen des Bodens leicht zusammen und bilden eine flächig dichte Struktur, sodass der Gasaustausch und Wassertransport behindert wird.

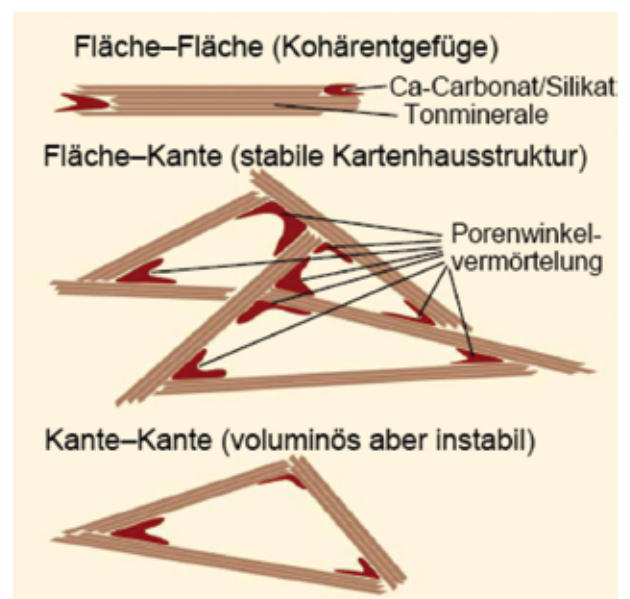
Die Porenwinkel werden erst bei ausreichender Ca-Versorgung des Bodens (Ca-Carbonat oder Ca-Silikat) mit fortschreitender Austrocknung „vermörtelt“.

Dadurch liegen die Tonteilchen nicht mehr plattig aufeinander, sondern befinden sich in einer kartenhausähnlichen Struktur. Beim Abtrocknen des Bodens zieht sich das kalkhaltige Wasser in die Porenwinkel der sog. „Kartenhäuser“ zurück.

Die Porenwinkel widerstehen dadurch leichter einem Aggregatzerfall. Es bilden sich mehr wasserführende Poren, wodurch die Wasserinfiltration verbessert wird. Auch die luftführenden Grobporen nehmen zu, wodurch sich kalte Böden im Frühjahr auch schneller erwärmen.

Ca-Sättigung am Sorptionskomplex

Auf kalkreichen Böden sind die Tonminerale am Sorptionskomplex zu rund 80 % mit Calcium und 10 bis 15 % mit Magnesium gesättigt. Die Böden sind locker und stabil. Bei einer Kalkung insbesondere schwerer Böden mit Branntkalk werden schlagartig hohe Mengen an Ca^{++}



Schematische Darstellung der Lagerungsformen von Tonteilchen im Boden (nach MEYER und POLLEHN, 1999).

(und Mg^{++}) freigesetzt, die als Reaktionsschwelle für eine rasche Tonflockung nötig sind.

Daher sind auf schweren Böden wasserlösliche Kalke (Branntkalk und Mischkalk) für die Tonflockung wichtig, weil säurelösliche Kalke (Kohlensaurer Kalk) speziell auf schweren Böden nicht rasch genug ausreichend Ca^{++} -Ionen freisetzen können.

Kohlensaurer Kalk wird durch Säuren gelöst und nur langsam zum wasserlöslichen $Ca(HCO_3)_2$ (Calciumhydrogencarbonat), auch Ca-Bicarbonat genannt, umgewandelt.

Branntkalk (CaO) reagiert hingegen spontan mit Wasser im Boden zu Calciumhydroxid $Ca(OH)_2$. Diese Bindungsform des Kalkes gelangt dann mit dem Bodenwasser an die Kontaktstellen der Ton-/Humusstoffe und wird dort entsprechend der elektrischen Ladung angelagert. Das ist eine der wichtigsten Ursachen für die Krümelbildung. Das $Ca(OH)_2$ der Bodenlösung fällt mit fortschreitender Austrocknung zu Calciumcarbonat $CaCO_3$ aus und vermörtelt so (Ton-Humuskomplexe) zu stabilen Aggregaten. (siehe auch Kapitel „Wie puffert Kalk im Boden“, Seite 28).

Langsam durch Kohlensäuren Kalk geflockte Böden sind zwar auch locker, aber noch nicht stabil vermörtelt. Eine Stabilisierung erfolgt ferner durch die Lebendverbauung, wo sich durch Schleimabsonderungen der Bodentierchen die Krümel miteinander verkleben. Pilzmyzele und Feinwurzeln (Mykorrhiza) durchwachsen und stabilisieren ebenfalls die Krümel.

Kalkung verbessert Regenverdaulichkeit und schützt vor Verschlämmung

Entkalkte Böden neigen besonders zur Verdichtung. Dies gilt vor allem für mittlere und schwere Ackerböden. Durch eine Kalkung wird nicht nur der Anteil an luftführenden Grobporen vermehrt, sondern es werden auch die wasserführenden Mittelporen günstig beeinflusst. Damit wird die Verschlammungsgefahr und der oberflächliche Wasser- und Feinbodenabtrag (= Oberflächenerosion) reduziert.

Bei einem Starkregen liegt die Versickerungszeit eines mit 200 dt Branntkalk gedüngten Ackerbodens mit ca. 25 Minuten deutlich über den Vergleichswerten einer ungekalkten Variante mit ca. 170 Minuten. Die wirkt sich auch auf die Gefügestabilität und Wasserdurchlässigkeit aus.

Erhöhung der Wasserdurchlässigkeit und Gefügestabilität durch Kalkung (n. Schuhbauer, 1997)		
pH-Wert	6,3 (- freier Kalk)	7,0 (+ freier Kalk)
Gefügestabilität	100	147
Wasserdurchlässigkeit	100	263
*Durch Aufkalkung auf pH 7 konnte die Strukturstabilität um fast 50 % erhöht werden und damit der Boden mehr als die doppelte Menge an Wasser „verdauen“.		

Stabile Bodenstruktur erleichtert Bodenbearbeitung

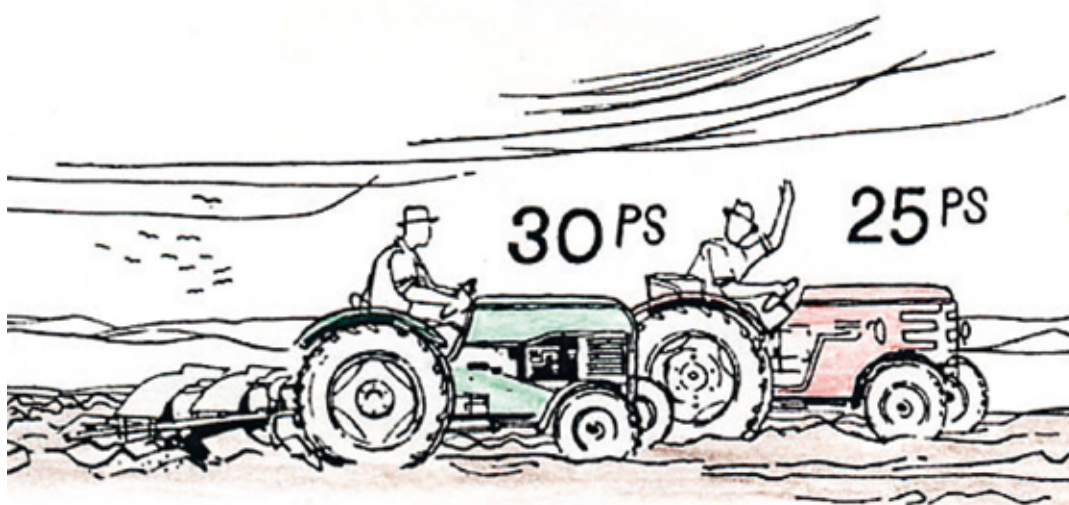
Durch eine stabile Bodenstruktur erhöht sich die Tragfähigkeit und die Verdichtungsneigung nimmt ab. Gleichzeitig führt der verbesserte Luft- und Wärmehaushalt dazu, dass der Boden schneller abtrocknet und sich rascher erwärmt.

Gekalkte Standorte können dadurch im Frühjahr früher befahren werden. Die Zeitfenster für Bodenbearbeitung und Bestellung werden somit ausgedehnt, eine flexiblere

Gestaltung der Arbeitsgänge ist möglich bzw. der Beginn der Wachstumsphase wird vorverlegt.

Gekalkte Böden bleiben locker

Bei länger anhaltender Trockenheit führt die stabilisierende Wirkung von Kalk dazu, dass beim Austrocknen viele kleine Aggregate gebildet werden. Kalkversorgte Böden schrumpfen langsamer und es entstehen im Vergleich zu kalkarmen Standorten auch weniger Spalten und Risse. Die mechanischen Belastungen an den Pflanzenwurzeln nehmen damit ab und die Böden bleiben locker. Gut mit Kalk versorgte Böden lassen sich leichter bearbeiten. Der für die Bearbeitung benötigte Kraftstoffbedarf wird reduziert.



Reduzierter Zugkraftbedarf von gekalkten Böden

Kalkung beugt Auflaufschäden vor

Kalk erhöht den pH-Wert, wodurch Säureschäden und damit verbundene Auflaufschäden durch ein Überangebot an Aluminium und Mangan (verstärkt unter pH-5) unterbunden werden. Auch keimen z. B. Weizen und Gerste bei niedrigen pH-Werten schlechter.

Kalkung reduziert Verschlämmung, Verkrustung und Erosion

Der Grund für Verschlämmungen ist, dass die Tonteilchen zu wenig stabil sind und dann in den Untergrund eingewaschen werden. Dadurch werden Grobporen verstopft, wodurch das Niederschlagswasser oberflächlich abfließt. Durch das Separieren von Ton und Schluff (Ton-Schluff-Trennung) bilden sich Bodenschichten mit gleichen Korngrößen, welche weder für Wasser noch für Luft nach oberflächlicher Abtrocknung durchlässig sind. Diese Verdichtungen (Tonverlagerung) behindern nicht nur den Gasaustausch mit der Bodenluft, sondern wirken nach Niederschlägen wie eine „betonierte“ Fläche und behindern den Saataufgang. Diese Verkrustungen müssen, sofern es die darauf angebaute Kultur erlaubt, mechanisch gebrochen werden. Eine Kopfkalkung mit 400 bis 800 kg/ha Branntkalk hilft als „Feuerwehrmaßnahme“, während größere Mengen zu einer oberflächlichen Verkrustung des Branntkalkes führen können.



Bodenstruktur-Stabilisierung mit Branntkalk



Bodenverschlämmung erschwert Wachstum der Pflanzen



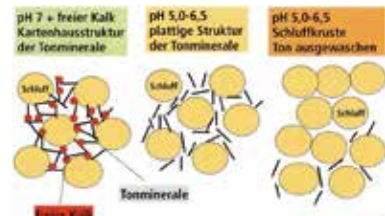
Bodenverkrustung behindert Keimling beim Durchwachsen

Foto: R. Keller

Böden mit hohem Tongehalt neigen zur Rissbildung



Ton-Schluff-Trennung und Verschlammung



n. Schmidt, 2013

Wenn die Ca-Sättigung unter 70% absinkt, kann es auf schluffreichen Böden bereits bei pH-Werten von 6,5 zu einer Ton-Schluff-Trennung kommen, sofern kein freier Kalk vorhanden ist. Dies kann dann zur Verschlammung bzw. nach Auswaschung von Ton in den Unterboden zur Bildung von Schluffkrusten an der Bodenoberfläche führen.

Beispiel: Bei einem Ackerboden < 4% Humus und einem pH-Wert von 5,8 genügt auf einem lehmigen Sand (IS) in der Gehaltstufe C eine Erhaltungskalkung von 10 dt CaO. Für schwere, lehmige Tone (IT) in der Gehaltstufe B ist hingegen eine Aufdüngung mit 59 dt CaO erforderlich. Bei höheren Humusgehalten von 4-8 % wären es bei einem lehmigen Ton noch 19 dt CaO. (Humus, siehe auch Seite 37)

Verstärkte Gefahr auf schweren Ackerböden

Schwere Böden brauchen mehr Kalk. Je höher der Tongehalt im Boden, desto wichtiger ist auch das Vorhandensein von „freiem Kalk“, um eine Ton-Schluff-Trennung und damit Bodenverschlammung bzw. Erosion zu verhindern.

Bereits bei pH-Werten um 6,5 kann es auf schweren Böden schon zu instabilen Verhältnissen d. h. plattiger Struktur der Tonminerale mit späterer Tonverlagerung in den Unterboden kommen. Dies kann im Boden neben Luftmangel und Störung der Wasserführung später auch bis zur Vernässung führen.

Bei diesem Vorgang der „**Pseudovergleyung**“ fehlen dann in der oberen Bodenkrume die Tonminerale zur Bildung stabiler Bodenkrümel.

Schluffreiche Lehm- sowie Tonböden mittleren Tongehalten von 15 bis 20 % neigen verstärkt zur Ton-Schlufftrennung, während Böden mit hohen Tongehalten verstärkt zur Rissbildung neigen (Seite 13, 14, 39, 45, 46, 47, 49). Auf schweren Böden ist die Kontrolle auf „Freien Kalk“ bzw. die Überprüfung der Ca-Belegung am Sorptionskomplex (Seite 31) wichtig.

Schwere Böden brauchen mehr Kalk

Je höher der Tongehalt und geringer der Humusgehalt im Boden, desto höher ist der erforderliche Kalkbedarf. Bei der „Ziel-Gehaltstufe C“, wo alle drei bis vier Jahre nur noch eine Erhaltungskalkung erforderlich ist, ist auf schwerem, d. h. tonigem Lehm bis Tonböden bei einem Humusgehalt < 4 % ein pH-Wert von 6,5 – 7,2 anzustreben.

Kalkungsempfehlung zur Aufdüngung bzw. Erhaltungskalkung von Ackerböden bei unterschiedlichen Bodenarten (bezogen auf vier Jahre) VDLUFA, 2010

pH-Wert	Humusgehalt < 4,0 %					Humusgehalt 4,1 % bis 8,0 %					Humusgehalt 8,0 % bis 15,0 %				
	Bodenart														
	S	SI	SL	L	IT	S	SI	SL	L	IT	S	SI	SL	L	IT
		IS	sL		T		IS	sL		T		IS	sL		T
Kalkmenge in dt CaO/ha															
4,5	30	57	87	117	160	21	46	71	95	115	9	27	48	65	76
4,6	27	53	82	111	152	17	42	66	89	108	5	23	42	59	69
4,7	24	49	77	105	144	13	37	60	82	100	4	18	35	52	63
4,8	22	46	73	100	136	10	33	54	75	93	4	13	29	46	56
4,9	19	42	68	94	128	6	28	48	69	86	4	9	23	40	50
5,0	16	38	63	88	121	5	24	42	62	78	4	8	17	33	43
5,1	13	34	58	82	113	5	19	36	55	71	4	8	11	27	37
5,2	10	30	53	75	105	5	15	31	49	69	0	8	10	21	30
5,3	7	26	49	70	90	5	10	25	42	56	0	8	10	14	24
5,4	6	22	44	65	90	5	9	19	36	49	0	8	10	13	17
5,5	6	19	39	59	82	0	9	13	29	41	0	8	10	13	16
5,6	6	15	34	53	75	0	9	12	22	34	0	0	10	13	16
5,7	6	11	29	47	67	0	9	12	16	27	0	0	10	13	16
5,8	6	10	25	41	59	0	9	12	15	19	0	0	10	13	16
5,9	0	10	20	36	52	0	9	12	15	18	0	0	0	13	16
6,0	0	10	15	30	44	0	0	12	15	18	0	0	0	13	16
6,1	0	10	14	24	36	0	0	12	15	18	0	0	0	13	16
6,2	0	10	14	18	29	0	0	12	15	18	0	0	0	0	16
6,3	0	10	14	17	21	0	0	0	15	18	0	0	0	0	16
6,4	0	0	14	17	20	0	0	0	15	18	0	0	0	0	0
6,5	0	0	14	17	20	0	0	0	15	18	0	0	0	0	0
6,6	0	0	14	17	20	0	0	0	0	18	0	0	0	0	0
6,7	0	0	14	17	20	0	0	0	0	18	0	0	0	0	0
6,8	0	0	0	17	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6,9	0	0	0	17	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7,0	0	0	0	17	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

pH-Klassen A B C D E
 Bodenart: S-Sand, SI-anlehmiger Sand, IS- lehmiger Sand, SL-stark lehmiger Sand, sL-sandiger Lehm, L-Lehm, IT-lehmiger Ton, T-Ton

Zwischenfrüchte helfen Boden stabilisieren

Neben Kalk helfen auch Zwischenfrüchte die Bodenstruktur zu verbessern. Erosionsschäden werden vor allem durch eine schlechte Wasserableitung des Bodens begünstigt. Neben einer Kalkung ist eine gute Humusversorgung, Stichwort „Immergrüner Acker“ für eine gute Bodenstrukturbildung wichtig. Speziell durch Anbau von Zwischenfrüchten kann über die Lebendverbauung (Ton-Humus-Komplexbildung) der Boden stabilisiert werden. Nur so bleiben Grobporen als Wasserdrainage auch bei größeren Niederschlagsereignissen erhalten. Zur Stabilisierung sind vor allem Kulturen mit einer kräftigen Wurzelbildung wie Ölrettich, Sonnenblumen, Senf etc. geeignet.



Gärsubstrate und Bodenverschlammung

Gärsubstrate bzw. Biogasgülle haben im Vergleich zu normalen Gülle einen höheren Ammoniumanteil und ähnlich wie Mineraldünger eine raschere N-Wirkung. Ferner fördert Ammoniumstickstoff den sog. „Priming-Effekt“, d.h. die N-Nachlieferung aus dem Dauerhumus. Gärsubstrate haben auch eine geringere Viskosität, was ein rascheres Eindringen bewirken kann. Auch wird dadurch das C:N-Verhältnis enger, wodurch die Mineralisierung gefördert wird.

Andererseits steigt durch den Gärprozess der pH-Wert, was ohne sofortige Einarbeitung bei höheren Temperaturen während der Ausbringung die Ammoniakabgasung erhöhen kann.

Ammoniumanteile einiger Dünger im Vergleich (Angaben in %)		
	Ammonium (NH ₄)	Organisch gebundener Stickstoff
Mineraldüngerstickstoff	100	-
Jauche	95	5
Rindergülle	50	50
Schweinegülle	65	35
Biogasgülle	70	30
Stallmist	15	85

BMLFUW 2006

Bei **Biogasgülle** werden durch den Gärprozess auch die langkettigen organischen Stoffe weitgehend abgebaut. Diese sind für die Lebendverbauung (Ton-Humuskomplexbildung) wichtig, da die Bodenmikroben ihre Energie aus dem Abbau der organischen Substanz schöpfen. Somit verringert sich die Energiequelle für die Mikroben zur Lebendverbauung. Ob dies für die Praxis relevant ist und sich langfristig (speziell bei Mais-Monokulturen ohne Zwischenfruchtanbau) nachteilig auf das Bodenleben bzw. Bodenstruktur auswirken kann, wird derzeit noch näher untersucht. Grundsätzlich bewirkt jeder oberirdische Pflanzenertrag auch einen unterirdischen Wurzeltrug im Verhältnis von etwa 1:0,7. Dieser steht ebenso den Bodenmikroben als Nahrungsquelle zur Verfügung.

Bei Düngung von Biogasgülle, die in Maisregionen ohne Zwischenfruchtanbau betrieben werden, steigt die Gefahr einer Verschlammung vor allem deshalb, weil der Boden bis zu einem halben Jahr offen, d.h. nicht bepflanzt und durchwurzelt ist.

Neben einer ausreichenden Humusversorgung ist daher speziell bei Hackfrüchten eine ausreichende Kalkversorgung mit freiem Calcium wichtig. Freier Kalk steht dem Boden sofort als „Mörtel“ für die Bildung eines stabilen Ton-Humus-Komplexes zur Verfügung. Die einwertigen Kationen (K, NH₄) in der Gülle führen bei gleichmäßiger Verteilung, d. h. Einhaltung der Düngermengen für die Sachgerechte Düngung zu keiner Beeinträchtigung der Bodenstruktur, insbesondere bei Einarbeitung der Gülle in die obere Bodenkrume.

Düngekalke:

Gruppen, Typen, Anwendungsformen

Kalkprodukte stammen entweder aus natürlichen Lagerstätten, welche direkt für die land- und forstwirtschaftliche Verwendung produziert werden, oder fallen als Nebenprodukte bei verschiedenen industriellen Prozessen an. Diese werden wiederum in Kalke der Eisen- und Stahlerzeugung und in Fällungskalke unterschieden.

Düngekalke unterliegen rechtlich der Düngemittelverordnung, wo das Inverkehrbringen und die Mindestanforderungen an die Produktqualität geregelt sind.

Bezüglich der Löslichkeit bzw. Bindungsform unterscheidet man zwischen Silikaten, Carbonaten und Oxiden (siehe Kapitel Qualitätskriterien von Düngekalcken auf Seite 58).

Düngekalck-Gruppen und -Typen

Gruppe	Typenbezeichnung	Mindestgehalte	Mindestfeinheit	Bemerkungen
Naturkalke	Kohlensaure Kalke	90 % CaCO ₃ bzw. 56 % CaO	100% <1mm 80% <0,3 mm	direkt aus natürlichen Kalk- und Dolomit-Rohstoff-Lagerstätten gewonnen
	Branntkalk	90 % CaO	< 8 mm	
	Mischkalk	60 % CaO	100% <1mm 80% <0,3mm	
Industriekalke	Hüttenkalke	42 % CaO	100% <1mm	aus der Eisen- und Stahlindustrie
	Konverterkalk	40 % CaO	80% <0,3mm	
Rückstandskalke	Carbokalk	30 % CaO		Fällungsprodukt aus Zuckersaftreinigung
	Schwarzkalk	38 % CaO		Kalkstickstoff-Prod.
	Zelka	43 % CaO		Zellstoffherzeugung
	Wasserkalk	30 % CaO		Wasseraufbereitung
	Kalkwaschschlämme	40 % CaO		aus der Kalksteinwäsche

*Für Kalkdünger gelten die in der Tabelle angeführten Mindestgehalte an CaO bzw. CaCO₃, wobei ein Teil durch Magnesium ersetzt werden kann. Ab einem Magnesiumanteil von 15 % MgCO₃ bzw. 7 % MgO darf die Typenangabe um den Begriff „Magnesium“ ergänzt werden.

Naturkalke

Die Aufbereitung von Naturkalcken erfolgt über Vermahlung von Kalkgestein bzw. magnesiumhaltigem Dolomitgestein. Durch Brennen von Naturkalcken im Kalkofen entstehen Brantkalk.

Kohlensaure Kalke bzw. Magnesiumkalke (Dolomitkalke)

Kohlensaure Kalke/Dolomitkalke enthalten das Calcium bzw. Magnesium in carbonatischer Bindungsform (CaCO₃, MgCO₃). Die Nährstoffgehalte sind von der Zusammensetzung der natürlichen Lagerstätten abhängig.

Kohlensaure Kalke aus alpinen Lagerstätten sind über Jahrtausende angereicherte und verdichtete Kalkablagerungen aus Muscheln, Korallen etc.

Kohlensäure Kalke sind für alle Bodenarten geeignet. Sie verfügen über eine langsame und milde Wirkung und eignen sich besonders für leichtere Acker- sowie Grünlandböden und Wald. Magnesiumhaltige Naturkalke können auf Sand- und Moorböden meist den gesamten Magnesiumbedarf für Boden und Pflanze abdecken.

Kreidekalke sind hingegen meist junge und wenig verdichtete, d. h. weiche Kalke, die durch Ausgasung von Kohlensäure aus dem Meer entstanden und dann wieder zu Kalk (CaCO_3) ausgefällt wurden. Sie zeichnen sich durch eine raschere Verfügbarkeit aus. Aber auch alpine Kalke können bei feiner Vermahlung eine Reaktivität von über 90 % erreichen, die dann in der Löslichkeit mit Kreidekalken vergleichbar sind. (Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht, Seite 7)

Brantkalk

Brantkalk enthält Calcium bzw. Magnesium in oxidischer Bindung (CaO/MgO). Sie entstehen durch Brennen von Kalkstein oder Dolomit bei Temperaturen zwischen 900 °C und 1200 °C. Hierbei wird die Carbonatform (CaCO_3 bzw. MgCO_3) durch die Freisetzung von Kohlendioxid (CO_2) beim Brennvorgang in die Oxidform (CaO bzw. MgO) umgewandelt. Brantkalk wird gemahlen oder körnig angeboten und haben aufgrund der raschen Löslichkeit von allen Kalken die beste Strukturwirkung.

Beachte:

Beim Ausbringen auf nasse Böden kann Brantkalk oberflächlich leicht verkrusten, wodurch seine Kalkwirkung eingeschränkt wird. Wegen seiner vorübergehenden ätzenden Wirkung ist Brantkalk für eine Kopfkalkung auf feuchte Pflanzenbestände ungeeignet. Bei längerer Lagerung bindet Brantkalk Luftfeuchtigkeit und reagiert zu Calciumhydroxid. Brantkalk sollte also nach der Anlieferung durch den Hersteller zügig verbraucht und am besten sofort nach dem Streuen seicht eingearbeitet werden.

Löschkalk (CaOH_2) ist ein durch Wasserzusatz gelöschter Brantkalk. Er entsteht nach der Düngung von Brantkalk im Boden (z. B. nach Regen) oder direkt durch Wasserzusatz zum Brantkalk im Kalkwerk ($\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} = \text{CaOH}_2$). Beim Löschvorgang kommt es zu einer starken Wärmefreisetzung und Volumenvergrößerung. Durch diese Sprengkraft beim Löschvorgang wird die Bodenstruktur (Grobporanteil) verbessert und eine raschere Bodenerwärmung erreicht. Ferner bildet sich beim Löschvorgang eine intensive Lauge mit einem pH-Wert von 12,5, welche schon seit Jahrhunderten als Desinfektionsmittel genutzt wird. **Löschkalk (Weißkalkhydrat)** wird u. a. als Kalkputz, Zusatz zum Mörtel, als Anstrich im Obstbau, früher auch verstärkt zur Desinfektion von Stallwänden etc. eingesetzt.

Mischkalke

Mischkalke werden durch Mischen von Kohlensäurem Kalk mit Brantkalk hergestellt. Sie enthalten dadurch sowohl carbonatische als auch oxidische Kalkanteile, d. h. sie wirken sowohl schnell (Oxidanteil) als auch langsam durch den Carbonatanteil. In Abhängigkeit von den Ausgangskomponenten (Kalkstein oder Dolomit) können die Magnesiumgehalte schwanken.



Anwendungsformen von Kalken

1. Mehle von vermahlenem (und/oder gebranntem) Kalk-/Dolomitstein

2. Granulate (regranulierte Mehle)

Feinvermahlene Kohlensäure Kalke/Dolomit-Mehle werden durch Versetzen von Bindemitteln (Melasse) z. B. wieder zu Granulaten, zu Korngrößen von 2 bis 6 mm gedreht, um eine staubfreie Streuung mit dem betriebseigenen Tellerstreuer zu ermöglichen.

Aufgrund der vorherigen Feinvermahlung sind diese Kalke abgesehen von der punktuellen statt der flächigen Verteilung genauso wirksam wie Mehle.

3. Körnungen (gesiebte Bruchkörnungen von Branntkalk)

Branntkalk kommt in faustgroßen Stücken aus dem Kalkofen und wird mechanisch zerkleinert bzw. für eine staubarme Streuung auf Korngrößen von 3 bis 8 mm abgeseibt. Diese Ausbringung ist nur bei gebrannten Kalken möglich, weil diese wasserlöslich sind.

Beachte: Gries- und Bruchkörnungen von Kohlensäuren Kalken, wie sie gelegentlich in Kleinpackungen für den Hobby- und Gartenbereich angeboten werden, sind hingegen weitestgehend unlöslich.

4. Natur-Feuchtkalke

Diese sind im Gegensatz zu den feuchten, industriellen Rückstandskalken nachträglich angefeuchtete Kalke. Sie werden vor der Auslieferung zur Staubbindung werkseitig exakt dosiert über eine Mischschnecke mit 4 bis 8% Wasser angefeuchtet. Dadurch können sie im Kipper-Lkw preiswert für den Bodenumschlag direkt zum Landwirt (ohne den Umweg über die Zwischenpuffersilos des Verteilerhandels) transportiert werden. Dort werden sie entweder am Feldrand oder in den Fahrsilos am Betriebsgelände abgekippt und mit einem Frontlader auf einen Großflächentellerstreuer geladen und staubarm ausgestreut.



Mischungen mit anderen Düngern

Hier eignen sich besonders Mehle mit gleichem Vermahlungsgrad wie z. B. Rohphosphate (z. B. Makaphos) oder maßgeschneiderte Mischungen, welche in einem Arbeitsgang mit der Erhaltungskalkung ausgebracht werden können.

Rückstandskalke und Gips

Hier handelt es sich um kalkhältige Stoffe, welche bei verschiedenen Verarbeitungsprozessen wie der Nahrungsmittelherstellung, der Kalkstickstoffherzeugung, der Zellstoff- und Papierherzeugung oder auch bei der Rauchgasreinigung als Nebenprodukt anfallen. Meist sind es Fällungskalke oder recarbonatisierte Kalke mit hoher Feinheit. Für die Verwendung als Düngekalke müssen sie vorher aufbereitet werden, da sie meist als Schlämme mit höherem Wassergehalt anfallen.

Gips gehört nicht zur Kalkgruppe, da Gips den pH-Wert nicht erhöhen kann. Er ist vorrangig ein Schwefeldünger (Seite 6, 8, 56, 88)

Carbokalk

Carbokalk ist der bedeutendste Rückstandskalk, der bei der Reinigung des Rübenzuckersaftes als Fällungsprodukt anfällt. Dieser Rückstand wird dann auf einen Wassergehalt von unter 30 % abgepresst und in die Landwirtschaft zurückgebracht.

Der Kalk liegt als Carbonat mit ca. 30 % CaO-Anteil vor. Carbokalk hat wegen seiner Feinkörnigkeit eine gute Wirkung. Neben Calcium und Magnesium enthält Carbokalk auch geringe Mengen an Stickstoff (ca. 0,4 %) und Phosphat (ca. 0,3 % bis 0,5 %).

Carbokalk wird bevorzugt nach der Ernte in Verbindung mit einer Strohdüngung oder dem Anbau von Zwischenfrüchten eingesetzt.

Konverterkalke

Konverterkalke werden durch Vermahlen von Konverterschlacke hergestellt. Sie sind ein Rückstandsprodukt bei der Stahlerzeugung und fallen bei der Glutschmelze im Hochofen bei ca. 1.700 °C an. Dabei fallen im Roheisen Kalk und Silicium als Koppelprodukt im glühenden Gemisch als Calciumsilikat (Ca_2SiO_4) an.

Nach der Vermahlung kann die Schlacke ähnlich wie Kohlensaurer Kalk eingesetzt werden. Konverterkalke sind speziell für saure Böden, Grünland- und leichte Ackerböden geeignet. Die durch den Hitzeprozess aufgeschlossene Kieselsäure kann auch zu einer Verbesserung der Verfügbarkeit von Phosphaten im Boden beitragen. Ferner wird der Kieselsäure eine gewisse Verbesserung der Resistenz gegenüber Pilzkrankheiten sowie der Halmstabilität zugesprochen.

Bedeutung der Kieselsäure

Der Gesamtgehalt an Kieselsäure (SiO_2) in verschiedenen Düngemitteln bzw. Bodenhilfsstoffen sagt noch nichts über deren Löslichkeit, d. h. über die Verfügbarkeit im Boden aus. So ist Kieselsäure, die als Quarzsand vorliegt, im Boden praktisch unlöslich.

Gesamtgehalte und lösliche Anteile von Kieselsäure in Düngekalken und Gesteinsmehlen (n. M. Rex, 1990)

	Gesamt % SiO_2	CAL-löslich % SiO_2	wasserlöslich % SiO_2	Anteil % CAL-löslich	Gesamt SiO_2 H ₂ O-löslich
Gesteinsmehle	34 +- 11	1,1 +- 1,5	0,4 +- 0,2	4 +- 5	1 +- 1
Konverterkalk	14 +- 5	9,5 +- 4,7	5,2 +- 1,4	68 +- 11	41 +- 11
Thomaskalk	8 +- 1	5,7 +- 0,3	2,8 +- 2,5	68 +- 4	32 +- 26

Die überwiegende Bindungsform der Kieselsäure im Konverterkalk ist Dicalciumsilikat, welches im Vergleich zu Steinmehlen eine gute Löslichkeit sowohl in CAL-Lösung als auch in Wasser aufweist.

Konverterkalke enthalten je nach Herkunft des Eisenerzes mind. 10 % Kieselsäure sowie etwa 2 % Spurenelemente wie Mangan, Zink, Bor, Molybdän etc.

Nach dem DMG dürfen jedoch gewisse Grenzwerte nicht überschritten werden.

Aufgrund der geltenden Schwermetallgrenzwerte ist Konverterkalk in Österreich derzeit nicht erlaubt.

Hüttenkalke

Hüttenkalke sind vermahlene Hochofenschlacken aus der Eisenerzverhüttung. Sie entstehen durch Zugabe von Kalk zum Roheisen, wodurch Ca-Silikate und Ca-Phosphate entstehen. Das Produkt ähnelt dem alten Thomasmehl. Diese langsam wirkenden Kalke auf Silikatbasis (Ca_2SiO_4) sind besonders zur Aufkalkung leichter Böden geeignet.

Schwarzkalk

Schwarzkalk ist ein Rückstandskalk aus der Kalkstickstoffherzeugung mit rund 40% CaO (Reinkalkanteil). Er enthält zusätzlich 12 % C (Kohlenstoff) und einen Reststickstoffgehalt von ca. 1 %. Dies wirkt z. B. positiv für die Strohhrotte. Die dunkle Farbe fördert die Bodenerwärmung.

Zelka

Zelka ist ein Nebenprodukt der Zellstoff- und Papierherzeugung. Der Kalk ist mikrofein und liegt nahezu vollständig als Carbonat vor.

Zitrogips

Zitrogips ist ein Nebenprodukt aus der Zitronensäureherzeugung in sulfatischer Bindung. Er wirkt als Gips ähnlich wie Calciumsulfat, d. h. Zitrogips erhöht den pH-Wert nicht. Er eignet sich für Böden mit hohen pH-Werten zur Calcium- und Schwefelzufuhr. Er liefert kontinuierlich Ca^{++} -Ionen für die Krumenstabilisierung. Dies ist auf Böden mit hohen pH-Werten über 7 wichtig, da hier das Calcium sehr rasch zu Carbonat gebunden wird und dann nicht mehr als aktiver „Mörtel“ fungieren kann (siehe Kohlensäuregleichgewichtskurve, Seite 7).

Marktbedeutende Kalk-Produkte nach Gruppen in Österreich

Produktbezeichnung - Handelsname	Lieferform	NW- „CaO“	wertb. Inhaltsstoffe Hauptkalk-Formen	Herkunft - Einsatzbereich - Verwendung
Karbonatische Kalke				
Kohlensäure Kalke				
Kohlensäurer Kalk	mehlig + feuchtet	> 50 %	> 90% CaCO ₃	Vermahlener gesiebter Kalkstein
KalkKorn / KalkKorn-S	granuliert	> 48 %	> 85% CaCO ₃ + 2 % S	Kalksteinmehl, mehlfrein trocken o. angefeuchtet
Meereskalk	granuliert	> 48 %	> 85% CaCO ₃	Regranuliertes Kalksteinmehl
PhysioMax	granuliert	> 42 %	> 76% CaCO ₃ + 6 % MgCO ₃	Regranuliertes Kreidemehl
Algenkalk	granuliert	> 44 %	> 75% CaCO ₃	Regranuliertes Kalksteinmehl mit Zusätzen
Güllekalk	mikrofein	> 48 %	> 85% CaCO ₃ + 2 % S	Regranuliertes Kalkalgenmehl
Futterkalke	gries + mehlig	> 50 %	> 90% CaCO ₃	Mikrofeines Kalkmehl mit Naturgips
Stall-Hygiene-Kalke	mikrofein	> 48 %	> 80% CaCO ₃	Kalksteinmehle unterschiedlicher Körnung Feine Kalksteinmehle mit amorpher Struktur
Magnesium-Kalke (dolomitische Kalke)				
Kohlensäurerer Magnesiumkalk	mehlig+feucht	> 50 %	> 15 % MgCO ₃ + 70 % CaCO ₃	Kalk-/Dolomitsteinmehl
DolLit / Dolo-40	mehlig+feucht	> 55 %	> 40 % MgCO ₃ + 50 % CaCO ₃	Dolomitsteinmehl
DoloKorn	granuliert	> 50 %	> 30 % MgCO ₃ + 60 % CaCO ₃	Regranuliertes Dolomitmehl
Magnesiummehl	mehlig	> 55 %	> 70 % MgCO ₃	Magnesitmehl
Gebrannte Kalke und Mischkalke				
Brantkalk Körnig 3-8	gekörnt	> 92 %	> 92 % CaO	Gebrannter, gesiebter Kalkstein
Brantkalk Körnig 1-4	gekörnt	> 92 %	> 92 % CaO	Gebrannter, gesiebter Kalkstein
Brantkalk mehlig 0-4	mehlig	> 92 %	> 92 % CaO	Gebrannter Kalkstein
Mischkalk	mehlig	> 60 %	> 30 % CaO + 60 % CaCO ₃	Mischung aus Brantkalk mit Kalksteinmehl
MikaLyt	mehlig	> 60 %	> 40 % CaO + 3 % S + 2 % SiO ₂	Mischung aus Brantkalk mit Kalksteinmehl mit Elektrolyten
Magnesium Mischkalk	mehlig	> 60%	> 30 % CaO+10% MgO + 60 % CaCO ₃	Mischung aus Brantkalk mit Dolomitmehl
DekaMix Hygienekalk	mehlig	> 60%	> 30 % Mg(OH) ₂	Mischung von Hydroxidischen Dolomit und Kalken mit Silikaten
Rückstandskalke und KalkSchlämme				
Carbo-Kalk	feucht	> 30 %	> 60 % CaCO ₃	Fällungskalk aus der Zuckerherstellung
Zelka/Feuchtkalk-43	feucht	> 43 %	> 80 % CaCO ₃	Fällungskalk aus der Zellstoffproduktion
Schwarzalk	feucht	> 39 %	> 75 % CaCO ₃	Fällungskalk aus der Kalkstickstoffproduktion
Konverterkalk	körnig	> 40 %	> 75 % CaSiO ₂	Rückstandskalk aus der Stahlindustrie
AGA-Kalk	flüssig	> 10 %	> 15 % Ca(OH) ₂	Rückstandskalk aus der Gasreinigung
TonKa-Kalkmergel	feucht	> 40 %	> 70 % CaCO ₃ + Tone	Pressrückstand aus der Kalksteinwäsche
Kalk-Klärschlämme	feucht	> 30 %	> 50 % CaCO ₃	Pressrückstand aus der Abwasserreinigung
Phosphatkalke und Mischungen				
(Ma)-KaPhos 5	mehlig + feucht	> 48 %	> 5 % P ₂ O ₅ + 80 % CaCO ₃	Mischung v. Dolomit-/Kalkmehl mit Rohphosphat
(Ma)-KaPhos 10	mehlig + feucht	> 45 %	> 10 % P ₂ O ₅ + 70 % CaCO ₃	Mischung v. Dolomit-/Kalkmehl mit Rohphosphat
DoloPhos 15	granuliert	> 40 %	> 15 % P ₂ O ₅ + 50 % CaCO ₃	Mischung v. Dolomit-/Kalkmehl mit Rohphosphat
ÖkoPhos Plus	granuliert	>35 %	> 5 % P ₂ O ₅ + 4 % S + 5 % SiO ₂ + 10 % MgCO ₃ + 30 % CaCO ₃	Mischung aus Dolomit, Rohphosphat, Naturgips, Silikat, Selen
Phisio-Mescal G18	granuliert	> 35 %	> 18 % P ₂ O ₅ + 65 % CaCO ₃ + 10 % MgCO ₃	Mischung aus Dolomit mit Rohphosphat
Schwefelkalke und Gips Produkte				
Kohlensäurer Kalk mit Schwefel	mehlig + feucht	> 45 %	> 2 % S + 80% CaCO ₃	Mischung Kalksteinmehl mit Naturgipsmehl
Kohlens. Magnesium Kalk mit Schwefel	mehlig + feucht	> 45 %	> 2 % S + MgCO ₃ >15% + 80 % CaCO ₃	Mischung Dolomitmehl mit Naturgipsmehl
Schwefelkalk	feucht	> 40 %	> 5 % S + 60 % CaCO ₃	Mischung Kalksteinmehl mit Rückstandsgips
Naturgips-Mehl	mehlig	> 0 %	> 17 % S	Vermahlenes, natürliches Gipsgestein
CaSulf	feucht	> 30 %	> 15 % S	Rückstandsgips aus der Rauchgasreinigung
BokaSulf	feucht	> 30 %	> 15 % S	Rückstandsgips aus der Rauchgasreinigung
CalziSulf-Zitrogips	feucht	< 0 %	> 17 % S	Rückstandsgips aus der Zitronensäureproduktion
ÖkoPhos Plus	granuliert	> 40 %	> 5 % P ₂ O ₅ + 4 % S + 5% SiO ₂ + 10 % MgCO ₃ + 30 % CaCO ₃	Mischung aus Dolomit, Rohphosphat, Naturgips, Silikat
DoloSul	granuliert	> 30 %	> 45 % MgCO ₃ + 45 % CaSO ₄	Regranulierte Mischung aus Dolomit- und Naturgipsmehl

Qualitätskriterien von Düngekalken

Düngekalke werden nach folgenden Parametern bewertet:

- Gehalte an Reinkalk (CaO) bzw. an CaCO_3 oder MgCO_3
- Nach der Bindungsform (Oxid, Hydroxid, Carbonat, Silikat)
- Gehalt an basisch wirksamen Bestandteilen berechnet als Reinkalk (CaO), was dem Säureneutralisationsvermögen (SNV) entspricht
- Gehalte an unerwünschten Nebenbestandteilen (z. B. Schwermetalle)
- Nach der Reaktivität bei carbonatischen Kalken als ein Indiz für die Umsetzungsgeschwindigkeit
- Nach der Mahlfeinheit bei ungebrannten Naturkalken (je feiner Naturkalke gemahlen sind, desto rascher und vollständiger die Umsetzung im Boden)

Beachte: Auch die technischen Eigenschaften wie das Schüttgewicht und vor allem der Feuchtigkeitsgehalt sind von Bedeutung, da diese Eigenschaften maßgeblich die Streueigenschaften (u.a. Verteilung und Staubbildung) sowie die Lagerfähigkeit beeinflussen. Die natürliche Färbung des Düngekalkes hat keinen Einfluss auf die Qualität bzw. dessen Wirksamkeit.

Was ist der Kalkwert

Der Kalkwert, auch als Reinkalkgehalt (CaO) oder Neutralisierungswert (SNW) bezeichnet, ist ein Maß für das Neutralisierungspotenzial. Er drückt aus, wie viele Säuren im Boden durch den eingesetzten Düngekalk neutralisiert werden können, um damit den pH-Wert anzuheben. Aufgrund der unterschiedlichen Bindungsformen von Düngekalken wird der Kalkwert zum Vergleich immer auf Basis CaO umgerechnet.

Berechnung des Kalkbedarfes

Die Berechnung des Kalkbedarfes wird auf Basis des Reinkalkgehaltes, d. h. des Gehaltes an CaO bzw. MgO, vorgenommen. Der Reinkalkwert wird von der Bindungsform beeinflusst. Wegen des geringeren Atomgewichtes von Magnesium im Vergleich zu Calcium entspricht 1 kg MgO der Kalkwirkung von 1,4 kg CaO.

Bindungsform beeinflusst Kalkwert

Bindungsform (Äquivalent)	Produkt	kg CaO
Calcumoxid (CaO)	Branntkalk	1,00
Calcumcarbonat (CaCO_3)	Kalkstein	0,56
Magnesiumcarbonat (MgCO_3)	Magnesit	0,66
Dolomit (CaMgCO_3)	Dolomit	0,6
Magnesiumoxyd (MgO)	Kauster	1,39
Magnesiumhydroxid (Mg(OH)_2)		0,96
Calcumhydroxid (Ca(OH)_2)	Kalkhydrat	0,75
Calcumsilikat (CaSiO_2)	Konverterkalk	0,48
Calcumsulfat (CaSO_4)	Gips*)	0

*) Die sulfatische Bindungsform von Calcium (Gips) ist nicht basisch wirksam, weshalb Gips auch kein Düngekalk ist. Gips ist hingegen ein Calcium- und Schwefeldünger.

Merke:

Eine **pH-Wert-Erhöhung** bzw. Säurverpuffung findet durch die basische Wirkung von Carbonaten, Oxiden und Silikaten von Calcium und Magnesium statt. Andere Verbindungen wie z. B. Calcium-Sulfate (Gips) sind basisch nicht wirksam. Nicht die zweiwertigen Kationen (Ca^{++} und Mg^{++}) bringen die basische Wirkung, sondern die Bindungsreste des Hydrogencarbonates (HCO_3) bzw. des Hydroxyl-Ions (OH^-).

Kalkbindungsform und Löslichkeit

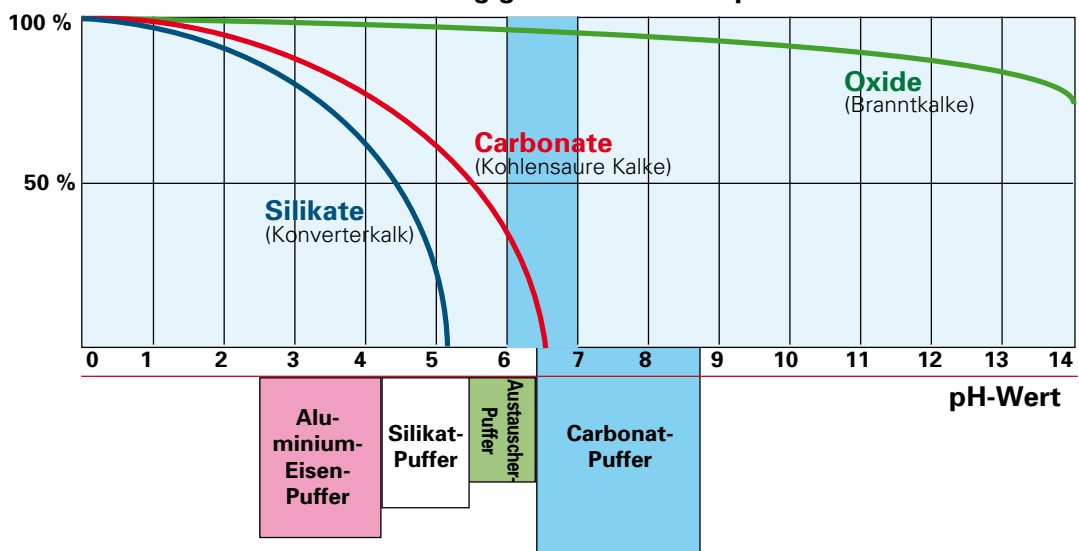
Die meisten Düngekalke liegen in Carbonatform vor. Bei den Naturkalke wird zwischen Kalkstein (Calcit oder Kalkspat) und dem magnesiumhaltigen Dolomit unterschieden. Die Aufbereitung von Kohlensäuren Naturkalke (CaCO_3) erfolgt durch Vermahlung. Durch Brennen von Naturkalke (Calciumcarbonaten) entstehen Branntkalke, d. h. das Calcium bzw. Magnesium liegt dann in Oxidform (CaO/MgO) vor.

Die Löslichkeit der Düngekalke hängt vorrangig von der Bindungsform des Kalkes (oxidisch, carbonatisch, silikatisch) sowie vom pH-Wert des Bodens ab. **Carbonate** und **Silikate** lösen sich nur bei niedrigen pH-Werten. Je niedriger, desto besser ist ihre Löslichkeit. Bei pH-Werten $> 6,2$ sind nur noch wasserlösliche **Oxide** (Branntkalk) bzw. **Hydroxide** gut verfügbar (siehe auch Kapitel Puffersysteme im Boden).

So sind Branntkalke (Oxide) und Hydroxide (Kalkhydrat) zum größten Teil wasserlöslich, d. h. sie können sich unabhängig vom pH-Wert des Bodens gut auflösen. Carbonatische Kalke und silikatische Kalke sind hingegen nur säurelöslich, d. h. sie werden erst durch die im Boden vorhandenen Säuren ähnlich wie bei der Carbonatverwitterung zu Calciumhydrogencarbonat $\text{Ca}(\text{HCO}_3)$ gelöst.

Löschkalk ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), auch als Kalkhydrat bezeichnet, entsteht durch Wasserzugabe (Ablöschen von Branntkalk) und hat eine ähnliche Löslichkeit bzw. Kalkwert (CaO) wie Branntkalk.

Löslichkeit von Kalkarten in Abhängigkeit vom Boden-pH-Wert



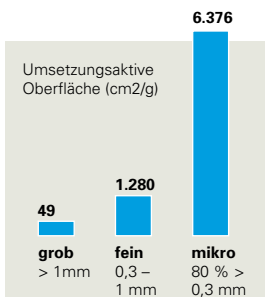
Boden-Puffer-Systeme in Abhängigkeit vom Boden-pH-Wert

Bei pH-Werten über 6,2 werden Kohlensäure Kalke bzw. bei pH-Werten über 5,5 silikatische Kalke kaum noch gelöst, d. h. sie können bei höheren pH-Werten nur noch zum Teil durch die Säureausscheidungen der Pflanzenwurzeln aufgeschlossen werden. Oxide sind hingegen auch bei höheren pH-Werten sehr gut löslich.

Die Wirkung von Kalkdüngern hängt neben der Bindungsform (Oxide wirken schneller als Carbonate oder Silikate) und dem pH-Wert im Boden auch vom Vermahlungsgrad ab, weshalb die Mahlfineinheit bei ungebrannten Kalken ein wichtiges Qualitätskriterium ist.

Formen, Gehalte und Nebenbestandteile einiger Kalkdünger

Düngemittel	Form	Kalkgehalt in % als CaO	Nebenbestandteile
Branntkalk	Oxid	65–95	z. T. Mg
Kohlensaurer Kalk	Carbonat	42–53	z. T. Mg
Hüttenkalk	Silikat	40–50	Mg, Spurennährstoffe
Konverterkalk	Silikat	40–50	P, Mg, Spurennährstoffe
Rückstandkalk	Carbonat, Oxid, Hydroxid	>30	Mg, Spurennährstoffe
Carbokalk	Carbonat	>20	N, P, Mg



Wirkung von Kohlensäurem Düngerkalk: Feinvermahlung schafft eine große umsetzungsaktive Oberfläche

Mahlfineinheit beachten

Die Mahlfineinheit beeinflusst bei ungebrannten Kalken die Löslichkeit und damit Wirksamkeit und ist somit ein wichtiges Qualitätskriterium. Eine stärkere Vermahlung bedeutet eine größere Oberfläche für die Reaktion mit Säuren und damit eine raschere Kalkwirkung. Nur wenn sich der Kalk zwischen den Fingern mehlig anfühlt, ist die Qualität in Ordnung. Grob sandige Produkte haben nur eine geringe Oberfläche und damit eine schlechte Löslichkeit. Dadurch ist auch die Kittfunktion zwischen Ton und Humus nicht ausreichend. Nur bei 80 % Mahlfineinheiten < 0,3 mm ist eine absehbar gute Wirkung zu erwarten. So sind Körnungen über 1 mm auch nach mehreren Monaten nicht bzw. kaum wirksam.

Die österreichische Düngemittelverordnung (2004) schreibt eine Mahlfineinheit (Körnung) von 80 % kleiner 0,3 mm und 100 % kleiner 1 mm vor, um in absehbarer Zeit eine gute Wirkung erzielen zu können. Carbonate und Silikate sind nur bodensäurelöslich, weshalb bei diesen Kalken eine Feinvermahlung besonders wichtig ist.

Reaktivität – Messzahl für Wirkungsgeschwindigkeit

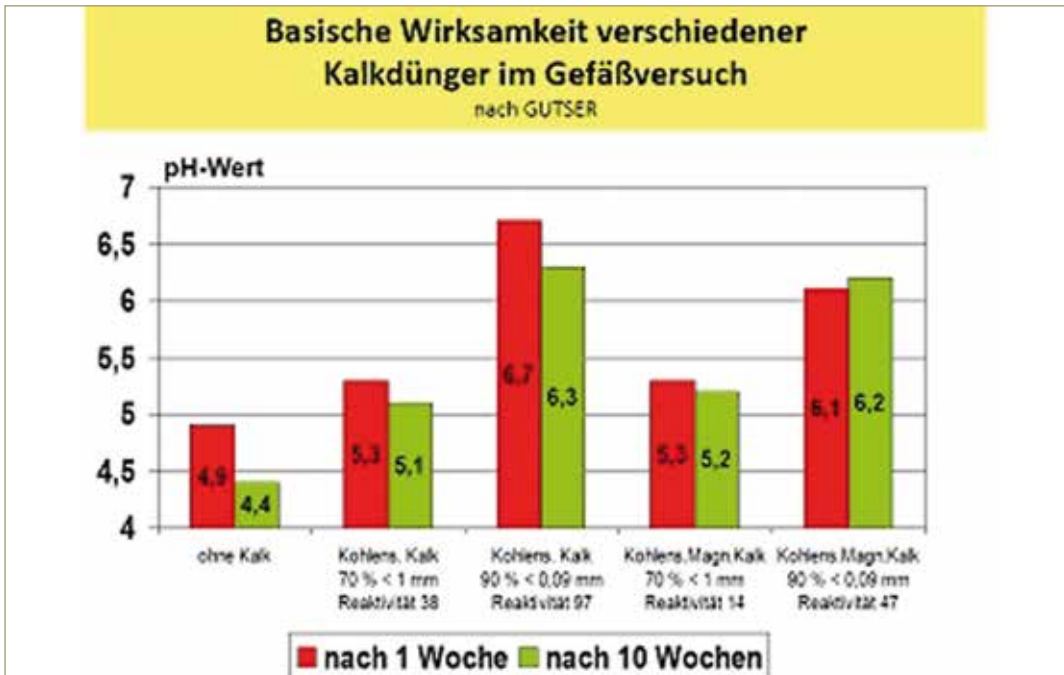
Zur besseren Abschätzung der Löslichkeit von carbonatischen Kalken wurde die Reaktivitätszahl in Ergänzung zur Mahlfineinheit (Mindestsiebdurchgang) als zusätzliches Qualitätskriterium eingeführt, um die übliche Unterteilung in Kreidekalke, d. h. weiche und harte Kalkgesteine, abzulösen.

Die Reaktivität eines Kalkes hängt von der mineralischen Zusammensetzung und der Mahlfineinheit ab. Sie zeigt als Indiz für die Umsetzungsgeschwindigkeit an, wie viele basische Bestandteile sich in verdünnter Salzsäure (pH 2) innerhalb von 10 Minuten lösen können. Der gelöste Anteil bezogen auf den Gesamtgehalt wird dann in % als Reaktivitätszahl angegeben.

Je feiner der Kalk gemahlen ist, desto rascher die Umsetzung im Boden.

Die höchsten Reaktivitätswerte erreichen weiche Kohlensäure Kalke mit einer Vermahlung < 0,1 mm. Kohlensäure Magnesiumkalke haben mit zunehmendem Magnesiumgehalt eine langsamere Reaktivität, d. h. sie brauchen etwas länger um ihre volle basische Wirksamkeit zu erreichen, weil **Magnesium** auf sauren Böden langsamer verfügbar wird als Calcium. Langfristig wirken sie auch aufgrund der höheren basischen Wirkung von MgO gegenüber CaO (+16 %) genauso gut (Siehe Seite 25, 29, 31, 32).

Düngekalke müssen gesetzlich vorgeschrieben eine Mindestreaktivität von 30 % aufweisen.



Je höher die Reaktivität, desto besser und schneller die pH-Wert-Änderung.

Reinnährstoffpreis (Preis pro kg CaO)

Der Reinnährstoffpreis dient dem objektiven Preisvergleich von Düngemitteln. Er errechnet sich, indem man den Preis von 100 kg eines Kalkdüngers durch den CaO-Gehalt (Reinkalkgehalt) dividiert.

$$\frac{\text{Marktpreis je 100 kg Dünger}}{\% \text{ CaO des Kalkdüngers}} = \text{Preis/kgCaO}$$

Beispiel:

Mischkalk mit 60% CaO kostet 7 € und Kohlensäurer Kalk mit 53 % CaO 6 € je 100 kg.

Mischkalk $7 \text{ €} / 60\% = 0,116$ je kg CaO

Kohl. Kalk $6 \text{ €} / 53\% = 0,113$ je kg CaO

Beide Produkte sind bezogen auf den Reinnährstoff praktisch gleich teuer, obwohl beim Produktpreis eine Differenz von 17 % besteht.

Umrechnungsfaktoren, Schüttgewichte und Farbe

Bei allen Berechnungen ist zu beachten, dass die Angaben bei Düngerkalken als Oxid oder als Carbonat vorliegen können. Als Bezugsgröße wird zumeist die Einheit CaO bevorzugt.

Schüttgewichte

Umrechnungsfaktoren:

CaO	x	1,785	→	CaCO ₃
Ca	x	2,497	→	CaCO ₃
Ca	x	1,399	→	CaO

CaCO ₃	x	0,560	→	CaO
CaCO ₃	x	0,400	→	Ca
CaO	x	0,715	→	Ca

MgO	x	2,092	→	MgCO ₃
Mg	x	3,468	→	MgCO ₃
Mg	x	1,658	→	MgO

MgCO ₃	x	0,478	→	Mg
MgCO ₃	x	0,288	→	Mg
MgO	x	0,603	→	Mg

Unterschiedliche Schüttgewichte von Düngekalken beruhen auf der unterschiedlichen Porosität, sowie Korngrößenverteilung und Vermahlungsgrad des Materials.

Zu beachten ist ferner, dass der Branntkalkanteil im Mischkalk bei längerer Lagerung Feuchtigkeit aus der Luft aufnehmen und sich allmählich zu $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (Kalkhydrat, Löschkalk, Kalklauge) umsetzen kann, was zu einer Volumenvergrößerung führt. Die Wirksamkeit wird dadurch nicht beeinträchtigt.

Schüttgewichte von Düngekalke und Kalkgrundstoffen

Kohlensäure Kalke < 0,3 mm	1.100–1.250 kg/m ³
Mikrofeine Kalzium-Carbonate	900–1.100 kg/m ³
Dolomitische Kalke < 0,3 mm	1.250–1.400 kg/m ³
Branntkalk körnig 3–8 mm	1.000–1.050 kg/m ³
Kalkhydrat trocken (Löschkalk)	700–800 kg/m ³
Mischkalk 60	1.100–1.250 kg/m ³
Magnesium-Mischkalk 60	1.200–1.300 kg/m ³
Kalkkorn (regranuliertes Kalkmehl)	1.050–1.150 kg/m ³

Die Färbung der Kalkdünger ist in der Regel weiß oder beige bis gelblich weiß. Sie kann mitunter auch grünlich (Graukalk, Schwarzkalk mit 12 % Kohlenstoff) sein, wenn beim Brennen Kohle eingesetzt wird. Diese Einfärbungen haben keinen Einfluss auf die Wirksamkeit.

Beachte:

Der Reinkalkgehalt, die Löslichkeit, die Ausbringung zum passenden Zeitpunkt, sowie die richtige Einarbeitung am Acker bestimmen die effektiven Kosten der Kalkung.

Düngemittelrechtliche Vorgaben

Die Düngekalke sind im Düngemittelgesetz DMG-2004 in der Type 4: „Mineralischer Kalk und Magnesiumdünger“ geregelt:

Dabei ist ein Mindestgehalt von 30% CaO als basischer Kalkwert, eine Reaktivität bei carbonatischen Kalken von mindestens 30%, sowie ein Mindestvermahlungsgrad von 100 % < 1mm und 80 % von kleiner 0,3 mm vorgeschrieben. Ferner werden die Mindestgehalte an wertbestimmenden Inhaltsstoffen für die typischen Handelsbezeichnungen wie Kohlensäurer Kalk, Kohlensäurer Magnesiumkalk, Mischkalk, Magnesium-Mischkalk und Branntkalk genau vorgeschrieben.

Kosten der Kalkung

Kalkpreise und Transportkosten können regional und saisonal differenzieren.

Neben dem Reinnährstoffpreis (Kosten je kg CaO) sind vor allem die Ausbringungskosten maßgeblich an den Gesamtkosten einer Kalkung beteiligt, d. h. je höher die Ausbringungskosten, desto interessanter werden Kalke mit einem höheren Reinnährstoffgehalt je Tonne.

Hektar-Kosten bei Anwendungen verschiedener Kalkprodukte

Düngekalk-Wert und Ø Marktpreis 2013 in Österreich

Kalkname Handelsname	Kalkwert „CaO“	ca. Marktpreis €/t lose oder Big-Bag	Preis/kg CaO Kalkwert	Streumenge kg/ha	Kosten* €/ha/Jahr
Kalk-Korn granuliert 2–6 mm	48%	150 €	0,31 €	1.000 kg/ha	150 €
Meereskalk granuliert 2–6 mm	48%	240 €	0,50 €	1.000 kg/ha	240 €
Physiomax granuliert 2–6 mm	48%	270 €	0,73 €	1.000 kg/ha	350 €
Kohlensaurer Kalk feucht / trocken	48% 53%	48 € 55 €	0,10 € 0,10 €	1.000 kg/ha	50 €
Güllekalz mehlfein trocken	48%	55 €	0,14 €	1.000 kg/ha	60 €
Mischkalk mehlfein trocken	60%	90 €	0,15 €	800 kg/ha	72 €
Branntkalk körnig 3–8 mm	92%	150 €	0,16 €	520 kg/ha	77 €

*) Kosten umgerechnet auf Basis von 1.000 kg kohlen-sauren Kalk (480 kg CaO) je ha

Vertriebsformen von Düngekalken

Düngekalke werden vom Produktionsbetrieb (z. B. Kalkwerk), vorrangig in mehlfeiner, trockener Form mit Silo-Lkw in sog. Zwischenpuffersilos zum Verteilerhandel gefahren. Vom Zwischenpuffer wird dann der Kalk meist in Mengen einer Streuerbehälterfüllung (~ 5 t) vom Landwirt abgeholt. Durch zunehmende Betriebsgrößen und den verstärkten Einsatz von Feuchtkalken verlagert sich die Zustellung zunehmend auch direkt zum Betrieb bzw. gleich direkt auf das Feld.

Lose-(Silo-)Umschlag

Der Loseumschlag läuft nach wie vor hauptsächlich über die Zwischenpuffersilos bei den Lagerhäusern bzw. Produkthändlern. Sind die Streuflächen weit vom Zwischenpuffer entfernt, gibt es auch die Möglichkeit des Aufstellens von Mobilsilos direkt am Einsatzort. Bei großen Schlägen und dem Vorhandensein von zwei Großflächenstreugeräten kann der Umschlag bzw. das Umladen auch direkt vom Silo-Lkw in das Streugerät erfolgen.

Eine weitere Möglichkeit des direkten Umschlags ist die Anlieferung in gefüllten Baustellen-Containern direkt zum Landwirt in Tonnagen von 10 bis 20 t. Ökonomisch rechnet sich dies nur bei hochwertigen Branntkalken.



Zwischenpuffersilo – Füllung beim Lagerhaus mit dem Silo-Lkw



1) Kalk im Baustellen-Container

2) Umladen vom Kalkmehl vom Silo-Lkw direkt in das Kalkstreugerät

Big-Bag-Umschlag

Der Bedarf von Düngekalken im Sack ist gering und beschränkt sich auf kleinere Feldstücke und den Gartenbereich. Im Zuge der Einführung der Kalkgranulate gewinnt der Sack (< 40 kg) wieder etwas an Bedeutung.

Zunehmend mehr wird hingegen der Einsatz von Branntkalk körnig und Kalk-Granulaten in den sog. Big Bags (Packungsgrößen 500 bis 1.200 kg) eingesetzt. Diese Big Bags kann der Landwirt in seinen Traktor-Anbaustreuer laden und dann selbst ausbringen, wenn es arbeitswirtschaftlich und von der Witterung her passt.

**Big-Bag Umschlag
am Feld**



Boden-Umschlag mit Feuchtkalk und Granulaten

Mit der Zunahme der Betriebsgrößen hat sich auch verstärkt der Bodenumschlag (Anlieferung mit dem Kipper-Lkw (schnelles Entladen durch Abkippen) als Alternative zum Silo-Lkw speziell für Feuchtkalke und industrielle Rückstandskalke durchgesetzt. Für größere arrondierte Flächen eignet sich bei trockener Witterung auch Branntkalk körnig für den Bodenumschlag auf einer befestigten Fläche oder Straße. Von dort wird der Kalk dann mittels Frontlader auf einen Zweischeiben-Großflächenstreuer bzw. Feuchtkalkstreuer geladen und mit einer Arbeitsbreite bis zu 24 m ausgestreut. Dadurch werden nicht nur die Überfahrten über die Felder auf ein Viertel reduziert (übliche Schneckenstreuerbreite ist 6 m), sondern auch Zeit gespart und unnötige Fahrspuren vermieden.



**Feuchtkalkstreuer-
Beladung am Feldrand**

Praxis der Kalk-Anwendung

Kalk wird nicht nur auf landwirtschaftlich genutzten Böden im Ackerbau und im Dauergrünland eingesetzt, sondern hat auch noch andere Einsatzbereiche.

Einsatz und Wirkungsbereiche verschiedener Kalkformen

Acker	Grünland	Stall	Wald	Teich
Bodenstruktur	Futterqualität	Hygiene	Bodenschutz	Wasserqualität
Nährstoffeffizienz	Ertrag	Komfort	Trinkwasserschutz	Hygienisierung
Feld- und Bodenhygiene	Mineralstoffgehalt	Tiergesundheit	Waldstabilität	Fischgesundheit
Erosionsschutz	Nährstoffausgleich	Milchqualität	Wasserinfiltration	Ertrag

Kalke sind Bodenverbesserungsmittel

Kalke sind in erster Linie Bodenverbesserungsmittel. Daher sollten Kalke möglichst gut mit der Bodenkrume vermischt, d. h. seicht eingeeget bzw. gegrubbert, aber nicht untergepflügt werden. Eine rasche und gleichmäßige Verteilung in die Bodenkrume ist vor allem bei Branntkalzen wichtig, da diese bei längerem Verbleib an der Bodenoberfläche mit dem Kohlendioxid der Luft zu Kohlsauerem Kalk verkrusten können, wodurch die rasche Wirkung verringert wird.



Kalk seicht einarbeiten

Fazit: Kalk nie unterpflügen, nur seicht einarbeiten.

Mehle wirken besser

Kalke wirken am besten in mehlfiner Form (trocken oder angefeuchtet), weil die größere Oberfläche einen besseren Kontakt zu den Bodenteilchen bringt.

Körnungen und Granulate dienen in erster Linie einem bequemen, staubfreien Handling. Die Wirkung kann aufgrund der punktuellen Ausbringung um 20–30% geringer sein als bei mehligem Kalkformen, vor allem wenn sie nicht in den Boden eingemischt werden können.



① Nur Regranulate aus mehlfine gemahlene Kohlensäuren Kalzen haben eine ähnliche Wirkung wie mehliges Kalke

② Feldlagerung von Feuchtkalk (mehliges Kalke)



③ Branntkalke körnig 3–8 mm für Ausbringung mit dem Tellerstreuer.

④ Mehlfine Misch- und Branntkalke vom Silo

Zeitpunkt der Kalkung

Grundsätzlich können Böden das fast ganze Jahr über gekalkt werden. Allerdings ergeben sich je nach Kultur bestimmte Termine, welche für eine Kalkausbringung günstig sind. Auch stellen die Pflanzen unterschiedliche Ansprüche, d. h. die Kalkbedürftigkeit der jeweiligen Kulturen ist zu berücksichtigen. Besteht in der Fruchtfolgerotation ein Kalkbedarf, so sollte versucht werden, den Kalk bevorzugt zu kalkliebenden Feldfrüchten (z. B. Klee, Raps, Gerste, Weizen, Mais) auszubringen.

Ein idealer Zeitpunkt für die Erhaltungskalkung ist die Stoppelkalkung nach der Getreide- bzw. Maisernte.

Günstige Kalkungszeiträume (Kalken, wenn der Boden trägt, DHG, 2006)

	Juli	Aug.	Sept.	Okt.	Nov.	Dez.	Jan.	Febr.	März	April	Mai	Juni
zu Stoppelfrüchten	Vorsaat											
zu Raps	Vorsaat											
zu Wintergerste	Vorsaat			Kopfkalkung								
zu Roggen		Vorsaat			Kopfkalkung							
zu Weizen		Vorsaat				Kopfkalkung						
zu Sommergerste und Hafer		Stopper		Winter				Vorsaat				
zu Zucker- und Futterrüben		Stopper		Winter				Vorsaat				
zu Mais		Stopper			Winter				Vorsaat			
zu Körnerhülsenfrüchten		Stopper		Winter				Vorsaat				
zu Feldgemüse								Vorsaat				
zu Kartoffeln										Kopfkalkung		
zu Luzerne		Vorsaat			Bestandskalkung							
zu Klee-Einsaaten								Vorsaat				
auf Wiesen				in der Vegetationsruhe						nach 1. Schnitt		
auf Weiden	nach dem Umtrieb			in der Vegetationsruhe						Kopfkalkung		
im Garten				Beete Kompost		Baumstämme Rasen						
auf Fischteiche	Teichwasser			Teichboden								
im Weinberg- und Hopfengarten				beim Rigolen und ihr Ertragsalter								
im Forstbetrieb	das ganze Jahr											

Aufwandsmengen der Kalkung

Wurde früher gemergelt, so wird heute gekalkt, um die Bodenfruchtbarkeit zu erhalten. Die für die „Erhaltungskalkung“ notwendigen Kalkmengen werden von den jährlichen Kalkverlusten bestimmt.

Diese Verluste sind standortspezifisch und hängen von der Bodenart, der Niederschlagsmenge, der Nutzungsart, der Fruchtfolge, der Düngungsform (sauer oder alkalisch) und nicht zuletzt auch von der Düngungsintensität ab. Dementsprechend stark schwanken die jährlichen Kalkverluste, die der Boden in der Regel von Natur aus nicht mehr abpuffern kann.

Sie müssen durch eine laufende Erhaltungskalkung ersetzt werden (siehe auch Seiten 12, 21, 27, 33, 34).

Die nötigen Kalkmengen für eine „**Gesundungs- bzw. Meliorationskalkung**“ werden im Bodenlabor ermittelt. Sie sind notwendig, wenn der anzustrebende Boden-pH-Wert unterschritten bzw. Wachstumsprobleme oder Bodenverdichtungen auftreten.

Kalkzehrer und Kalkmehrer		in kg CaO/ha/Jahr
Pflanzenentzug und Ernteabfuhr (lt. Entzugstabellen)		25 - 80
Auswaschung	< 500 mm NS	50 - 200
	< 1.000 mm NS	150 - 300
	> 1.000 mm NS	250 - 400
Neutralisationsbedarf	Immissionssäuren	10 - 30
	Bodensäuren	20 - 60
	Kalkzehrende Dünger	70 - 200
Zufuhr an Basen	Kalkmehrende Dünger	+
	Kalkung	+
Mittlerer jährlicher Kalkbedarf (Ackerland)		250 – 500

* die Kalkmehrerung bzw. -zehrung der wichtigsten Mineraldünger in kg CaO sind im Anhang in der RWA-Dünger-Liste 2013 vermerkt.

Ermittlung des Kalkbedarfes

Zur Ermittlung des „Kalkbedarfes“ gibt es mehrere Methoden (siehe Methoden der Ermittlung des Kalkbedarfes, Seite 91). In Österreich finden die Richtlinien für die Sachgerechte Düngung (SGD) Anwendung. Zur Kalkbedarfsermittlung wird der pH-Wert gemäß ÖNORM L 1083 nach der Calcium-Chlorid-Methode (CaCl₂) gemessen und die Bodenschwere (Tongehalt) nach ÖNORM L 1061-2 bestimmt. Aus dem Tongehalt wird die Bodenart abgeleitet. Bei der Standardbodenuntersuchung wird der Kalkbedarf über den pH-Wert unter Berücksichtigung der Bodenart (Tongehalt) und des Humusgehaltes bestimmt. Angestrebt wird die Ziel-„pH-Klasse C“.

Merke: Je schwerer (tonreicher) der Boden und je geringer der Humusgehalt ist, desto höher muss der pH-Wert bzw. die Kalkung sein.

Kalkung auf Ackerland

Grundsätzlich können Böden fast das ganze Jahr über gekalkt werden, sofern der Boden tragfähig ist. Auf Ackerland wird die Erhaltungskalkung meist im Laufe der Fruchtfolge bevorzugt zu kalkbedürftigen Kulturen in Abständen durchgeführt.

Erhaltungskalkung

Für die Erhaltungskalkung gilt auf Ackerland (bei Gehaltsklasse C) je nach Bodenschwere alle drei (bis vier) Jahre eine Empfehlung von etwa 10-15 dt CaO (für leichtere Böden) bzw. 20 t CaO (für schwerere Böden) [siehe Tabelle Seite 68].

Gesundungskalkung

Liegt der pH-Wert unter dem von der jeweiligen Bodenart anzustrebenden pH-Wert (Stufe C), ist eine Gesundungskalkung erforderlich. Dabei sollten die in Abhängigkeit von der Bodenart angegebenen einmaligen Höchstgaben in dt CaO/ha nicht überschritten werden, um einer zu abrupten Anhebung des pH-Wertes und damit evtl. vorübergehender Festlegung von Spurenelementen vorzubeugen.

Bei der Gehaltsstufe C genügt eine Erhaltungskalkung. Diese ist auf schwereren Böden auch bei höheren pH-Werten erforderlich, sofern kein freier Kalk vorhanden ist. In der Stufe D/E ist keine Kalkung erforderlich. Liegt der im Labor ermittelte pH-Wert unter der Ziel-Gehaltsstufe C, so ist eine Gesundungskalkung notwendig, die bei der Kalkbedarfsberechnung (Angabe in dt CaO/ha) mitberücksichtigt wird.

Höhe der Gesundheits- bzw. Erhaltungskalkung auf Ackerland < 4 % Humusgehalt (LFL 2012)

Bodenart	Gesundungskalkung (Gehaltsstufe A/B)		Erhaltungskalkung (Gehaltsstufe C)		keine Kalkung; erforderlich (Gehaltsstufe D/E) bei pH-Wert
	bei pH-Wert	einmalige Höchstgabe dt CaO/ha	bei optimalem pH-Wert	Menge für 3 Jahre dt CaO/ha	
Sand	< 5,4	15	5,4–5,8	7	> 5,8
schwach lehmiger Sand	< 5,8	20	5,8–6,3	12	> 6,3
stark lehmiger Sand bis schluffiger Lehm	< 6,2	60	6,2–6,5 u. 6,6–6,8	17	> 6,8 u.
toniger Lehm bis Ton	< 6,6	100	6,6–6,7 6,8–7,2	20	> 7,2 u. 6,8–7,2(+)

(-) kein freier Kalk (Salzsäuretest) Erhaltungskalkung erforderlich

(+)freier Kalk (Salzsäuretest) Erhaltungskalkung nicht erforderlich

*Anzustrebende pH-Bereiche liegen auf Ackerböden < 4 % Humus (auf schweren tonigen Lehmböden mit über 35 % Tonanteil) zwischen pH 6,6 und 7,2, auf mittelschweren (stark lehmigen Sand- bis schluffigen Lehmböden) mit 15 bis 25 % Tonanteil bei etwa pH 6,2 bis 6,8 und auf leichten (schwach lehmigen Sandböden) mit weniger als 15 % Tonanteil bei etwa pH 5,8 bis 6,3.

Meliorationskalkung

Unter Meliorationskalkung versteht man eine einmalige Zufuhr höherer Kalkgaben zur Verbesserung der Bodenstruktur von degradierten Böden über den Krumbereich hinaus. Sie erfolgt meist in Verbindung mit anderen bodenverbessernden Maßnahmen (siehe auch Meliorationskalkung verbessert Grobporenanteil Seite 14).

Wann welchen Kalk verwenden

Kalke wirken mit unterschiedlicher Geschwindigkeit. Soll der Kalk sofort wirken, sind stets Brannt-/Mischkalke sinnvoll. Dies ist z. B. bei akuten Säureschäden (Auflaufschäden im Bestand), einer Vorsaatkalkung zu Rüben, Mais oder Raps oder zur Bekämpfung von Kohlhernie, Wurzelbrand, Schwarzfäule, Schnecken etc. erforderlich.

Auf „*schweren Ackerböden*“, wo pH-Werte von 6,5 und darüber angestrebt werden und es vor allem um die rasche Bildung einer stabilen Bodenstruktur geht, werden ebenfalls bevorzugt wasserlösliche Branntkalke/Mischkalke oder Löschkalk (Kalkhydrat) eingesetzt. Ebenso zur *Gesundungskalkung* von versauerten sowie verdichteten bzw. verschlammten Böden. Auf schweren Ackerböden sollte zur Struktursicherung auch immer „freier Kalk“ vorhanden sein.

Zur reinen **Erhaltungskalkung** sind grundsätzlich alle Kalkdünger geeignet.

Auf „*leichten Ackerböden*“ genügt der Einsatz von Kohlensäuren Kalcken. Sie können aufgrund des geringeren Tongehaltes nur geringere Kalkmengen einbauen. Auf humosen Ackerböden (über 15 % Humusgehalt) genügen ebenfalls niedrigere Kalkgaben zur Stabilisierung des pH-Wertes.

Auf leichten Ackerböden sollten Einzelgaben von über 20 dt CaO vermieden werden, da ein zu rascher pH-Wert-Anstieg vorübergehend auch die Nährstoffverfügbarkeit beeinträchtigen kann. Bei einer erforderlichen **Gesundungskalkung** (Aufkalkung) ist speziell auf leichten Böden die erforderliche Kalkmenge auf mehrere Gaben aufzuteilen. Auf „humusreichen Grünlandböden“ genügt der Einsatz von Kohlensäuren Kalken, da Grünlandböden durch den höheren Humusgehalt seltener Strukturprobleme haben als Ackerböden. Zur **Meliorationskalkung** werden am Acker bevorzugt Branntkalk eingesetzt.

Umrechnung des Kalkbedarfes von t CaO/ha auf die Kalkmenge je nach Kalkdüngemittel

Kalkdüngemittel	Umrechnungsfaktor von CaO auf Kalkdüngermenge
Branntkalk	1,0
Mischkalk	1,5
Kohlensaurer Kalk	2,0
Konverterkalk	2,0
Carbokalk	4,0

Stoppelkalkung

Ein idealer Zeitpunkt für die Erhaltungskalkung ist die Stoppelkalkung nach der Getreide- oder Maisernte, weil zu diesem Zeitpunkt der Boden meist tragfähig ist und ein allfälliger Bodendruck durch die nachfolgende Bodenbearbeitung wieder ausgeglichen werden kann. Dabei ist auch der Einsatz von *Feuchtkalken* möglich. Der Vorteil sind die nahezu staubfreie Ausbringung sowie die günstige Bodenlagerung direkt beim Landwirt.

Bei der Stoppelkalkung nach Getreide ist darauf zu achten, dass der auf die Stoppeln gestreute Kalk nicht direkt untergepflügt wird, d. h. nur leicht mit einem mischenden Bodenbearbeitungsgerät (z. B. Grubber) mit dem Oberboden (10 bis 15 cm tief) vermischt wird. Bei regelmäßiger Erhaltungskalkung reichen meist Streumengen von 1000–1500 kg CaO (Reinkalk) in Abständen von drei bis vier Jahren (Bodenuntersuchung) aus. Bei gleichzeitigem Bedarf an Magnesium (vor allem auf Granit-, Gneis- oder sandigen Böden) ist magnesiumhaltigen Kalkformen der Vorzug zu geben.



*Ein Bodenumschlag ist bei trockenem Wetter auch mit Branntkalk körnig möglich. Dieser wird direkt mit dem Frontlader in den Großflächen-Tellerstreuer geladen und mit einer Streubreite bis zu 24 m ausgestreut. Durch die doppelte Streubreite wird die Flächenleistung erhöht sowie die Bodenbelastung reduziert.

Vorsaatkalkung

Eine Vorsaatkalkung wird bevorzugt zu Rüben, Mais oder Raps mit kleineren Mengen von 400 bis 600 kg/ha Brannt-/Mischkalk speziell auf schweren und zur Verdichtung neigenden Böden durchgeführt. Der Vorteil liegt darin, dass der Kalk nur mit der obersten Bodenschicht vermischt wird und dann im Oberboden eine hohe Ca-Konzentration vorliegt. Diese Kalke bewirken unabhängig vom pH-Wert eine verstärkte Tonflockung, was sich günstig auf die Krumendurchlüftung sowie Verschlammungsreduktion auswirkt (siehe Kalk fördert Bodenstruktur, Seite 45).

Eine Vorsaatkalkung auf leicht angefrorenen bzw. tragfähigen Böden kann bis kurz vor dem Anbau erfolgen und hat mehrere Vorteile. Der Kalk wird mit der Saatbettbereitung in den obersten Bodenhorizont eingearbeitet. Damit wird das Bodenkrümelgefüge gefestigt, die Regenverdaulichkeit verbessert und die Gefahr einer Verschlammung bzw. Bodenerosion verringert. Auf leichteren Böden leisten Kohlensäure Kalke ebenfalls eine gute Wirkung.

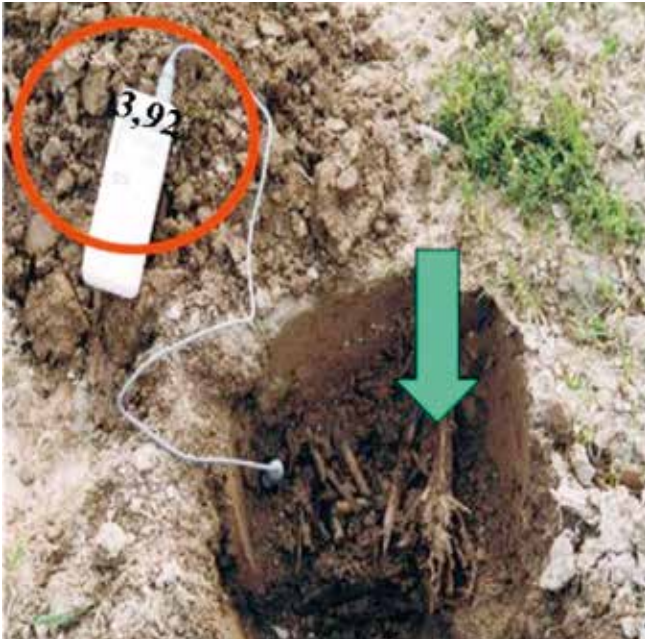
Generell ist bei der Vorsaatkalkung auf eine gute Querverteilung zu achten.



Maisstrohkalkung

Die Maisstrohkalkung ist eine wichtige Hygienemaßnahme gegen **Pilzkrankheiten (Fusarien)** und dient auch zur Reduktion des Infektionsdruckes. Die Wirkung beruht darin, dass sich die Pilzsporen vor allem im feuchten und sauren Milieu verstärkt vermehren. Durch eine Kalkung mit Misch-/ Branntkalk wird vorübergehend ein alkalischer pH-Bereich um das Maisstroh geschaffen, bei dem die Pilzvermehrung stark reduziert wird.

Ideal wäre es, wenn der Kalk mehrere Tage durch Tau und Niederschläge mit dem Stroh vermischt wird; wobei auch ein zusätzliches Häckseln die Wirkung verstärkt. Die Strohrotte setzt bei gekalktem Stroh früher ein und verringert dadurch die Bildung einer Maisstrohmatazre, die vor allem durch zu feuchte Bodenbearbeitung (Luftabschluss nach dem Pflügen) entsteht.



**Typische Maisstrohmatratze
durch zu feuchte
Bodenbearbeitung**
(Foto: G. Hutter)



**Stoppelkalkung
auf Mais**

Einsatz von Branntkalk

Branntkalk ist wasserlöslich und hebt den pH-Wert im Krumbereich kurzfristig über pH 8 an, wodurch das Pilzwachstum reduziert wird.

Vor allem empfindliche Kulturen wie Raps, Rüben, Lauch, Kohl können durch eine Vor-
saatkalkung auf die Krume effizient vor Kohlhernie, Wurzelbrand, Schwarzfäule, Rüben-
und Zwiebfäule geschützt werden. Gleichzeitig erfolgt eine stärkere strukturverbes-
sernde Wirkung durch den Branntkalk.



Kohlhernie ist ein Schleimpilz und führt zu krebsartigen Wucherungen am Wurzelhals bei Raps und anderen Kreuzblütlern im Feldgemüsebau.

Branntkalk wird zur Bekämpfung der **Kohlhernie** gemahlen oder mit einer Körnung von 0 bis 4 mm in einer Aufwandmenge von 800 bis 1.200 kg/ha vor dem Anbau von Raps auf die saatkfertige Krume gestreut und anschließend max. 5 bis 10 cm tief in die Krume eingestriegelt.

Ein **Branntkalkschleier** auf der Krume ist auch ein wirksames, natürliches Mittel gegen Nachtschnecken.

Auch **Fußkrankheiten** im Getreide (Schwarzbeinigkeit, Halmbruchkrankheiten) werden durch parasitäre Pilze verursacht, die oft den Halmgrund oder Wurzelhals befallen. Eine Kopfkalkung mit Brannt- oder Mischkalk von 300 bis 600kg/ha im zeitigen Frühjahr bzw. eine Stoppelkalkung nach Getreide hilft ferner die Strohreste zu desinfizieren. (siehe auch Maisstrohkalkung).

Eine **Kopfkalkung** auf die Kartoffelpflanzen hat eine vorbeugende Wirkung gegen die *Kraut- und Knollenfäule*. Die Damm- und Kopfkalkung wird auch deshalb empfohlen, damit die Knollen nicht direkt mit dem Kalk in Kontakt kommen, was den Schorfbefall begünstigen kann. Diese Maßnahme nimmt mit dem vermehrten Anbau von Industriekartoffeln wieder zu.

Die Kalkung darf daher nicht vor der Bestellung der Kartoffel eingearbeitet werden, da bei pH-Werten über 5,5 die Manganverfügbarkeit verschlechtert wird und damit das Risiko eines Schorfbefalles erhöht wird.

Die Kalkung muss nach dem Legen, auf den Damm bis in den ca. 20 cm hohen Bestand erfolgen. Die handhohen Stauden müssen abgetrocknet sein und die Düngung direkt auf den Kopf mit ca. 15 bis 20 dt/ha Brannt-/Mischkalk oder 20 bis 30 dt/ha Kohlensaurem Kalk erfolgen, um dem Schorf keinen Vorschub zu leisten.



Branntkalk gegen Schwarzfäule bei Rüben



Branntkalk verätzt den Schleimfuß von Nachtschnecken



Kopfkalkung bei Kartoffel

Kalkung im Grünland

Das Grünland stellt aufgrund des höheren Humusgehaltes geringere Ansprüche an die Kalkversorgung als das Ackerland. Der höhere Humusgehalt in Grünlandböden bedeutet eine höhere Aggregatstabilität im Oberboden und einen besseren Schutz vor dem Aufprall von Regentropfen durch die ständige Vegetationsdecke. Dadurch kann ein Verschlämmen im Oberboden weitgehend verhindert werden. Ferner erhöht ein höherer Humusgehalt das Wasserhaltevermögen, wodurch der Oberflächenabfluss bei Starkregenereignissen verringert wird (Erosionsschutz).

Im Grünland genügt bezüglich der Kalkform auch der Einsatz von Kohlensäuren Kalken. Eine Erhaltungskalkung bzw. Anhebung des pH-Wertes auf mindestens pH 5,5 ist aber notwendig, um die Nährstoffverfügbarkeit sowie eine gute biologische Aktivität (Bodenleben) aufrechtzuerhalten. Auch wertvolle Futtergräser und vor allem Leguminosen gedeihen bei höheren pH-Werten besser. Selbst der robuste Weißklee gedeiht bei einem pH-Wert unter 5 kaum noch. Die Bildung wertvoller Braunhuminsäuren im Boden ist ebenfalls vom pH-Wert abhängig.

Anzustrebende pH-Bereiche für Grünlandböden (max. 15 % Humus) (LFL 2012)

Bodenart	anzustrebender pH-Bereich (Gehaltsklasse C)	Erhaltungskalkung * (in Gehaltsklasse C) (dt CaO/ha)	Gesundungskalkung ** (in Gehaltsklasse A/B) (dt CaO/ha)
Sand	4,7–5,0	4	15
schwach lehmiger Sand	5,2–5,5	5	15
stark lehmiger Sand	5,4–5,7	6	20
sandiger Lehm	5,6–5,9	7	25
schluffiger Lehm			
toniger Lehm			
lehmiger Ton	5,7–6,1	8	30
Ton			

* Erhaltungskalkung alle drei (bis vier) Jahre

**Einmalige Höchstgabe

Viehbesatz fördert Nährstoffkreislauf

Im Grünland beeinflusst auch der Viehbesatz über den Wirtschaftsdüngerkreislauf (Rückführung von Calcium und Magnesium) den Basenhaushalt. Eine GVE (Großvieheinheit) liefert über den Kot jährlich etwa 75 kg Reinkalk (CaO) in den Kreislauf zurück. 1 m³ Rindergülle unverdünnt enthält etwa 3 kg CaO und 1,5 kg MgO.

Extensivierungsmaßnahmen sowie Almen mit geringerer Bestoßung durch Weidevieh zeigen eine rasche Zunahme der Bodenversauerung.

Mit der Bodenversauerung wird auch der Phosphor in schwer lösliche Formen übergeführt. Die Pflanzenverfügbarkeit von Kalium, Magnesium sowie Molybdän (wichtig für die Knöllchenbakterien) nimmt ab. Ebenso verschwinden zunehmend die wertvollen Futterpflanzen, die höhere Ansprüche an den pH-Wert stellen (siehe auch Kapitel pH-Wert-Leitparameter für Bodenfruchtbarkeit).

Versauerung fördert Podsolierung

Infolge der Versauerung kommt es langfristig zu einer Zerstörung des Bodengefüges und in weiterer Folge zur Podsolierung. Dabei zerfallen die Tonminerale, Aluminium wird freigesetzt und die organische Substanz wird kaum noch zersetzt. In der weiteren Folge wird Rohhumus verstärkt an der Bodenoberfläche angereichert. Die Verlagerung gelöster Tonminerale führt dann zu einer Verdichtung im Unterboden und letztlich zu staunassen Böden (siehe Seiten 16, 39).

Ein Podsol ist ein Bodentyp, der die Auswaschungsvorgänge wie kein anderer Boden sichtbar macht. Die bis in den Unterboden reichenden dunklen Bänder zeigen den verlagerten Humus an. Auch der Kalk wird mit den Niederschlägen weitgehend ausgewaschen, wodurch der pH-Wert absinkt.

In tieferen Schichten führt die Podsolierung zu einer Verringerung der Wasserleitfähigkeit, wodurch sich Stauhorizonte bilden, die bei entsprechender Durchfeuchtung auch zu Bodenrutschungen führen können. Infolge der Podsolierung kann sich das Wasserleitvermögen im Oberbodens (A-Horizont) um die Hälfte verringern.

Abnahme der Wasserleitfähigkeit nach Podsolierung (n. Mader, 1999)

Bodentyp	A-Horizont (Oberboden)	B-Horizont
Braunerde	201	221
Podsolierte Braunerde	106	202

***Auf Almböden kommen podsolige Böden dreimal häufiger vor als auf Talböden** (Juritsch, 2008).

Vernässung – Folge der Versauerung

Auf extensivem, schlecht gedüngtem und damit versauertem Grünland herrscht meist ein Nährstoffmangel, wodurch zuerst das Auftreten von Nährstoffarmutsanzeigern wie Zittergras, Ruchgras, Wolligem Honiggras, Klappertopf, Augentrost etc. zunimmt.

Später gesellen sich sog. „Sauergräser“ wie Bürstling und Rasenschmiele hinzu und dementsprechend sinken der Ertrag und der Futterwert.

Abnehmendes Pflanzenwachstum bedeutet auch weniger Wurzelmassebildung und damit weniger Wasserpeicherung bzw. Wasseraufnahme und Verdunstung durch die Pflanze. Für die Produktion von 1 kg Heu werden über die Transpiration (Wasserverbrauch und Abgabe über die Blattoberfläche) ca. 700 l Wasser verdunstet. Selbst bei einem nur mäßigen Ertrag von nur 6.000 kg Heu/ha sind dies 4.200 m³ Wasser, was einer Wassersäule von 42 cm entspricht.

Je weniger Wasser produktiv und über die Pflanze verarbeitet wird, desto mehr Wasser verbleibt am Boden, wodurch die Gefahr der Vernässung zunimmt. Das verstärkte Auftreten von Nässeanzeigern wie Binsen, Seggen, Wollgras etc. ist die Folge.

Versauerung fördert Wassererosion

Mangelnde Düngung verringert die Wurzelbildung und damit das Wasserhaltevermögen. Dadurch nimmt der oberirdische Wasserabfluss zu. Eine intensiv genutzte Dreischnittwiese kann mehr als doppelt so viel Wasser aufnehmen, wie eine extensive Zweischnittwiese. Auf einer ungedüngten und nicht mehr beweideten Bürstlingswiese fließt das Regenwasser fast zur Gänze oberflächlich ab. Die Pflanzen legen sich um und wirken dann wie ein Schilfdach.

Nicht mehr bewirtschaftetes Grünland (Braunland statt Grünland) führt auch zu einem vermehrten und beschleunigten Wasserabfluss in umliegende Bäche und Flüsse.

Für die Produktion von 1 kg Heu werden über die Transpiration 700 l Wasser verdunstet

Abfluss und Versickerung von 100 mm Regenwasser pro Stunde in Abhängigkeit von der Vegetation (n. Mayer, 1976)

Vegetation	Abfluss (mm)	Versickerung (mm)
Mähwiese	10	90
Fichtenwald	22	78
Zwergsträucher	56	44
Schlechte Wiesen	58	42
Weiderasen	67	33
Rhododendronsträucher	64	37
Bürstlingwiese	98	2

Futteranalyse erlaubt keine Aussage über Kalkversorgung

Der Kalkgehalt im Grünlandfutter erlaubt keine Aussage über den Säuregrad des Bodens, da der Kalkgehalt im Futter vorrangig von der botanischen Zusammensetzung abhängt. Dabei haben Gräser nur etwa ein Drittel des Kalkanreicherungsvermögens wie Kräuter oder Leguminosen, d. h. je höher der Kräuter- und Kleeanteil, desto höher der Ca-Gehalt im Futter bzw. desto weiter wird das Ca:P-Verhältnis im Futter.

Mineralstoffgehalt in %, der TM in mg/kg TM						
	Ca	P	Mg	K*	Cu	Co
Gräser	0,60	0,22	0,15	mittel	7	0,03
Leguminosen	1,50	0,26	0,25	niedrig	9	0,07
Kräuter	1,70	0,30	0,35	hoch	12	0,11

Kalkung fördert wertvolle Futtergräser

Auf sauren Standorten, speziell bei pH-Werten unter 5,5 kann eine Kalkung sowohl die Futterqualität als auch den Ertrag verbessern. Eine Kalkung fördert die wertvollen „Süßgräser“ und verdrängt „Sauergräser“ mit geringem Futterwert.

Wird ein Grünlandboden nicht mehr gedüngt bzw. beweidet, so versauert vorerst der Boden, dann verändert sich der Pflanzenbestand in Richtung „Sauergräser“ und in weiterer Folge kann der Standort auch vernässen. Im Dauergrünland wirken sich pH-Werte unter 5,5 bereits negativ aus.

Kalkwirkung in Abhängigkeit vom pH-Wert des Bodens im Mittel von 12 Jahren (n. Zürn, 1968)

Versuch	Säurezustand des Bodens	pH-Wert	Heuertrag dt/ha		
			bei NPK	bei NPK + Kalk*	± durch Kalk
1.	Neutral	6,5	83,3	82,0	- 1,3
2.	Schwach sauer	6,0	82,3	82,1	- 0,2
3.	Schwach sauer	6,0	76,7	79,2	+ 2,5
4.	Schwach sauer	5,5	70,9	76,1	+ 5,2
5.	Sauer	5,0	59,1	68,1	+ 9,0
6.	Stark sauer	4,5	59,0	66,4	+ 7,4
7.	Sehr stark sauer	4,0	65,7	75,7	+ 10,0
8.	Sehr stark sauer	3,8	65,9	80,7	+ 14,8

*alle 2 bis 3 Jahre 15 bis 20 dt CaCO₃



Wolliges Honiggras
Pteridium aquilinum

Adlerfarn
„Giftpflanze“

Besenheide oder Heidekraut (*Calluna vulgaris*)

Schwarz- oder Heidelbeeren
(*Vaccinium myrtillus*)

Kalkdüngungsversuch Rotthalmünster

Den Einfluss einer langfristig unterlassenen Kalkung auf den pH-Wert sowie die botanische Zusammensetzung zeigt besonders augenscheinlich ein 1961 von Prof. Dr. Bachtaler angelegter Kalkdüngungsversuch in Rotthalmünster (1969–2007) auf einer Parabraunerde aus Löß. Dabei wurde der Einsatz sauer wirkender Düngemittel (Superphosphat, Schwefelsaures Ammoniak) mit alkalisch wirkendem Düngemittel (Thomasmehl) verglichen. Bei der sauren Variante fiel der pH-Wert im Laufe des Versuches auf pH 3,5 ab.

Hochwertige Futtergräser wie Deutsches Weidelgras, Wiesenrispe, Wiesenfuchschwanz etc. wurden im Laufe der Jahre bei saurer Düngung fast völlig zurückgedrängt. Deutliche Unterschiede zeigten sich bei der Entwicklung des Heuertrages allein bereits durch den unterschiedlichen Einsatz zwischen sauer bzw. alkalisch wirkenden P-Düngern. Die Stickstoff-Variante (NPK) zeigte auf dem versauerten Boden keine Wirkung.

Kalkdüngungsversuch Rothalmünster

(Düngung mit alkalisch und sauer wirkenden Düngern)

Heuerträge in dt/ha Ø 1961–2007

Kontrolle	PK		NPK	
ungedüngt	Sauer	Alkalisch	Sauer	Alkalisch
58	83	102	84,0	118

Kalkausbringung auf Grünland, Weiden und Almen

Auf Grünland und Weiden bzw. Almen kalkt man am besten im Spätherbst oder im zeitigen Frühjahr. Grundsätzlich ist eine Kalkung auch zwischen den einzelnen Aufwüchsen möglich.

In der Regel genügt im Grünland und Feldfutterbau der Einsatz von Kohlensäuren Kalken bzw. Magnesiumkalken.

Erhaltungskalkung

Als Faustzahl für die Erhaltungskalkung reichen Streumengen von 1.000 – 2.000 kg/ha Kohlensäurem Kalk alle drei (bis vier) Jahre. Auch die gemeinsame Ausbringung von Kohlensäuren Kalken mit Wirtschaftsdüngern ist möglich (siehe spezielle Fragen der Kalkanwendung).

Sofern kein Kalkstreuer vorhanden ist, kann der Kalk auch zwischen mehreren Lagen Mist mit dem Miststreuer oder mit dem Güllefass ausgebracht werden.

Für das Grünland haben sich auch Naturfeuchtkalke bewährt, welche problemlos bei Abdeckung mit einer Plane über mehrere Monate am Feldrand zwischengelagert werden

Zeigerpflanzen
sauer
Borstengras
Heidekraut
Heidelbeere
Weiches Honiggras
Flutterbinse
Kleiner Sauerampfer
Drahtschmiele
Adlerfarn
Arnika
basisch
Pastinak
Espargette
Wiesensalbei
Sichelklee
Aufrechte Trespe
Fingerkraut
Stängellose Distel



Kalkausbringung im Grünland



**Alm- und Schipisten-
Kalkung**



**Kronenverlichtung
reduziert die
Assimilationsfläche**

können. Bei gleichzeitigem Phosphatbedarf können auch Mischungen von Kohlensäuren Kalken mit weicherdigen Rohphosphaten in einem Arbeitsgang ausgebracht werden.

Düngezeitpunkt

Der ideale Düngezeitpunkt im Grünland ist entweder der Herbst nach der letzten Nutzung bzw. Beweidung oder das Frühjahr. Theoretisch kann auch zwischen den einzelnen Aufwüchsen gekalkt werden, wenngleich hier bei Trockenheit eine gewisse Gefahr der Futtermittelverschmutzung besteht.

Kalkung auf Almen und Schipisten

Schipisten, welche im Sommer bestoßen und damit auch gedüngt werden, haben weniger Probleme mit der Versauerung als nicht mehr bewirtschaftete Almen, wo sich meist der Bürstling neben Adlerfarn, Schwarzbeeren etc. infolge der Versauerung ausbreitet.

Waldkalkung

Waldböden unterliegen natürlichen Versauerungsprozessen aufgrund der positiven Wasserbilanz in unserem humiden Klima. Aber auch saure Ausgangsgesteine (Granit, Gneis), wie sie z. B. entlang der Böhmisches Masse vorkommen, sowie Immissionen (Saurer Regen) oder Waldnutzung durch Streurechen, Schneitelung führen zur Versauerung von Waldböden. Dadurch erschöpfen langfristig die Puffersysteme und die pH-Werte in z. B. reinen Fichtenwäldern können bis auf pH 3,5 und darunter absinken. Dadurch geht auch die biologische Aktivität zurück.

Die Folge sind Rohhumusaufgaben mit biologisch schwer abbaubaren Nadel- und Ernterückständen, da bei diesen pH-Werten kaum noch abbauende Bodenbakterien leben können.

Mit sinkendem pH-Wert nimmt der Tonzerfall und damit die Auflösung von Al-Oxiden/Hydroxiden zu. Bei Al-Konzentrationen von 10 bis 20 mg/l werden auch Feinwurzeln und die Mykorrhiza geschädigt, sodass die Wasser- und Nährstoffaufnahme beeinträchtigt wird. Bei einem Ca/Al-Verhältnis < 1 beginnt ferner die Schädigung der Fichtennadeln. Dadurch hält der Waldbestand auch negativen Umwelteinflüssen (Käfer, Winddruck, Frost, Dürre) schlechter stand.

pH-Wert und Basensättigung kontrollieren

Die gezielte Zufuhr von Nährstoffen (Bodenuntersuchung, Nadelanalyse) kann vor allem die Vitalität des Waldes und vielfach auch den Ertrag verbessern. Neben dem pH-Wert ist die effektive (aktuelle) Austauschkapazität und die Basensättigung von Bedeutung. Bei einer Basensättigung (Ca, Mg, K) unter 50 % geht zunehmend die Fähigkeit verloren weitere Säureeinträge (H^+ , Al^{+++} , Fe^{++} , Mn^{++}) abzupuffern. Mit der Verschlechterung der Austauschkapazität werden auch irreversible Degradierungsvorgänge eingeleitet (siehe Seite 32).

Magnesium und Kalium

Viele Waldstandorte leiden unter einem ausgeprägten Magnesium- und zum Teil auch Kaliummangel meist in Verbindung mit einer zu geringen Basensättigung von oft unter 20 %. Eine gezielte Kalkung mit Kohlensäuren Magnesiumkalken kann ferner den Re-

genwurmbesatz erhöhen und indirekt den Nährstoffkreislauf ankurbeln, ferner die Basensättigung am Sorptionskomplex verbessern, was sich letztlich auch günstig auf den Wasserhaushalt auswirkt.

Eine abrupte Aufdüngung (pH-Schock) kann hingegen auf das Bodenleben und die Wurzeln auch ungünstig wirken, weshalb Kalk-Einzelgaben von ca. 3 t/ha nicht überschritten werden sollten.

Kalium-Mangel Buche **Kalium-Mangel Fichte** **Mg-Mangel Fichte** **Mg-Mangel Föhre**



K+S Beratungsbroschüre Nährstoffmangel im Wald, 1985

Mg-Mangel Buche

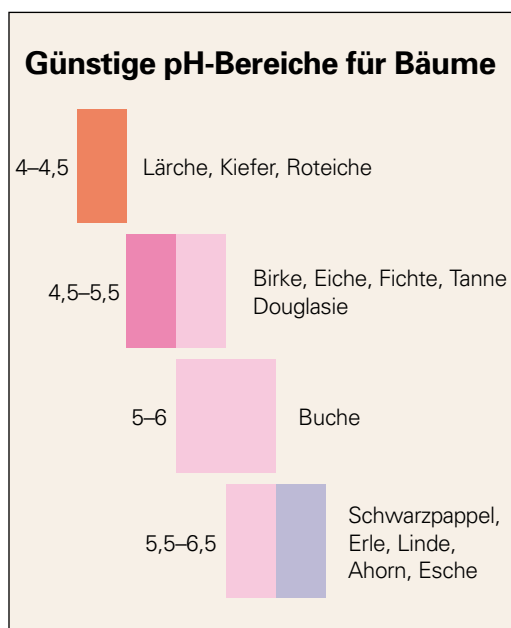


Die Aufwandsmengen sollten maximal 3 t/ha an Kohlensaurem Magnesiumkalk betragen. Die Kosten für die Waldkalkung inkl. Ausbringung liegen bei rund 85,- €/t (Stand: 2013). Im steilen Gelände ist die Ausbringung oft nur mit dem Helikopter möglich.

Kalkansprüche von Bäumen

Die Bäume haben sich vielfach an die schlechteren Bodenverhältnisse der Waldböden angepasst, da in der Regel nur die nicht ackerfähigen Böden zur Waldnutzung verblieben sind.

Während z. B. Buche, Eiche, Linde, Ahorn dankbar für Böden mit einem höheren pH-Wert (Basensättigung) sind, gedeihen Nadelbäume (insbesondere Fichte) auch noch bei pH-Werten von 4. Werte unter pH-4 führen zu einer verstärkten Auswaschung von Kationen (K, Mg) und verschlechtern auch die Nährstoffverfügbarkeit.



Aus K+S Beratungsbroschüre Nährstoffmangel im Wald, 1985



Waldkalkung verbessert die Bodenstruktur

Wirtschaftlichkeit der Waldkalkung

Eine Waldkalkung kann auf sauren Standorten durch die Verbesserung der Bodenstruktur und der biologischen Aktivität mittelfristig die Zuwachsraten verbessern. Der Oberboden ist naturgemäß stärker versauert als der Unterboden, da die Versauerung von oben nach unten stattfindet. Eine hohe Rohhumusaufgabe (Nadelstreu) verzögert die Kalkwirkung, da die Kationen (Ca, Mg) nur sehr langsam in den Unterboden gelangen. Die Wirtschaftlichkeit einer Waldkalkung hängt vorrangig von der Bodenbonität als Maßstab für die Standortgüte ab und sind unter Berücksichtigung des Holzpreises im Einzelfall zu prüfen. Eine Bonität von 11 bedeutet z. B. einen Zuwachs von 11 Vorratsfestmetern (Vfm) pro ha/Jahr. Für die Hauptbaumarten wird ein Referenzalter von 100 Jahren verwendet.

Der Umrechnungsfaktor von Erntefestmeter (Efm) zu Vorratsfestmeter (Vfm) beträgt 0,78 bzw. von Vfm zum Gewicht in t 0,42.

Eine Langzeitstudie (2012) über Waldbodenkalkung auf verschiedenen Standorten in NÖ an der HLWU-Yspertal zeigt, dass sich eine Kalkung je nach Bestandesalter und Bodenbonität bereits nach sechs bis zehn Jahren durch den Mehr-Nutzholzertrag rechnen kann. Der max. Ertragszuwachs ist je nach Standort zwischen zehn und 25 Jahren nach der Kalkung zu erwarten. Nach 35 Jahren waren keine Mehrzuwächse mehr messbar. Der kurzfristige Mehrertrag betrug 24 %, der durchschnittliche Mehrzuwachs (Betrachtungszeitraum über 20 Jahre) lag bei 13 % gegenüber den ungekalkten Flächen.

Eine hohe Effizienz zeigt vor allem die Düngung von Christbaumkulturen mit Magnesiumkalken, wo die vergilbten Nadeln wieder rasch grün werden und der Wachstumsschub bereits nach ein bis zwei Jahren einsetzt.



Teichkalkung mittels Steuerboot mit Kohlensäurem Kalk



Teichkalkung zur Regulierung des pH-Wertes im Wasser vom Teichrand aus

Kalkeinsatz in der Teichwirtschaft

Eine Teichdüngung dient der Erhaltung fruchtbarer Teiche, wobei pH-Werte im Teichboden von 6,5 angestrebt werden. Nur dann bildet sich feiner, kolloider Faulschlamm, dem die Unterwasserpflanzen ihre Nahrung entnehmen können.

Kalk macht den Schlamm wieder funktionsfähig und setzt dabei auch wieder Phosphorsäure frei, welche auch für die Entwicklung der Nahrungskette wichtig ist. Die im Teich durch pflanzliche Organismen (Algen, Makrophyten) erzeugte Biomasse durchläuft auf dem Weg zu den Fischen als Endglieder der Nahrungskette mehrere Stufen.

Dabei dient die Teichkalkung vor allem der Bildung einer positiven Wasserflora und Fauna. Saure Moorteiche, z. B. aus Nadelforsten, haben ein braunes, eisenhaltiges Wasser und sind wenig produktiv. Es breiten sich säureliebende Pflanzen aus, die ähnlich wie auf Landböden durch eine Kalkdüngung wieder zurückgedrängt werden können. Eine Kalkung fördert das Wachstum von Plankton und auch den Ertrag. Die braune Wasserfarbe verschwindet allmählich. Getrübte Teiche im Frühjahr deuten auf eine lebhaftere Produktion von Wasserlebewesen hin.

Eine Teichkalkung wird auch zur Hygiene (Schlammdeinfektion bei abgelassenen Teichen) und zur Verbesserung der Fischgesundheit (Kiemenfäule) durchgeführt. Dazu werden vorbeugend Kohlensäurer Kalk bzw. nach Ausbruch der Kiemenfäule 200 bis 300 kg/ha Branntkalk ausgebracht.

Zur Desinfektion von Teichen sollte vor allem der Teichboden nach Ablassen des Wassers mit Branntkalk bestreut werden. Die Regulierung des pH-Wertes im Wasser erfolgt vorrangig mit feinstvermahlenem Kohlensäurem Kalk. Dieser wird mittels Steuerboot oder vom Teichrand aus auf die Wasseroberfläche ausgeblasen.

Optimale pH-Bereiche für Fische

Die meisten Fische bevorzugen pH-Werte im Wasser von etwa 5,5 bis 6. Unter 5,5 werden Fische vorzugsweise an den Kiemen geschädigt. Unter pH 5 kann sogar der Tod eintreten. Aber auch pH-Werte über 8 sind kritisch, da mit steigendem pH-Wert verstärkt Ammoniumstickstoff zum fischtoxischen Ammoniak umgewandelt wird. Eine höhere Sauerstoffzehrung (Sauerstoffmangel steigt mit der Temperatur) fördert die Umwandlung zu Ammoniak. Ebenso ein verstärkter Abbau (Mineralisation) von abgestorbener Pflanzenmasse.

Sauerstoffarmut am Teichboden kann durch zu viel organische Biomasse im Wasser bzw. einen zu hohen Fischbesatz entstehen, da der Abbau von 1 t Biomasse etwa 1,5 t Sauerstoff benötigt. Neben einer Verringerung des Fischbesatzes kann ein Übermaß an organischer Substanz durch eine Kalkung auf den abgelassenen Teichboden wieder niedergeschlagen werden. Der Sauerstoffgehalt im Wasser sollte für Karpfen 4 mg/l und für Forellen 6 mg/l (besser 10 mg/l) nicht unterschreiten.

Der Abbau von 1 t Biomasse benötigt 1,5 t gelösten Sauerstoff

Sanierung eutropher Seen durch Kalkung

Es gibt mehrere Maßnahmen zur Restaurierung eutropher Seen, wie Entschlammung (Absaugung von Sedimenten), Tiefenwasserableitung, Belüftung, mechanische Entkrautung, Nährstofffällung etc. (siehe Broschüre „Eutrophierung – Ursachen und Maßnahmen“).

Eine Variante ist die Sanierung durch Kalkung mit Calciumcarbonat oder Brannt- bzw. Löschkalk, wodurch der natürliche Vorgang der „Calcitfällung“ (siehe Kalk-Kohlensäure Gleichgewichte Seite 7), herbeigeführt wird. Dieser Selbstreinigungsmechanismus wird in eutrophen Seen oft durch erhöhte gelöste Phosphat-Konzentrationen (PO_4) gehemmt. Eine Kalkung eignet sich besonders für schwach eutrophe Hartwasserseen. Ziel ist das Entfernen von Phosphor und Algenbiomasse aus der Freiwasserzone.

In kleineren Seen mit hohen organischen Kohlenstoffgehalten im Sediment kann durch Zugabe von Eisen-III-Sulfat bzw. -chlorid als auch Nitrat die Mineralisierung beschleunigt und gleichzeitig die P-Bindung verbessert werden. Es bilden sich große Flocken, die auf ihrem Sinkweg Phosphate sowie auch Algen zur Sedimentation bringen und damit dem Wasserkörper entziehen. Der Schlamm wird rascher zersetzt bzw. mineralisiert. Da die Trübstoffe gebunden und ausgefällt werden, verbessert sich auch die Sichttiefe. Das Wasser wird wieder klarer und die Lichtdurchlässigkeit verbessert (siehe auch Krümelstabilitätstest Seite 85). Damit wird auch eine langsamere Erwärmung des Wassers und bessere Sauerstoffsättigung für die Fische und Wassertiere erreicht. Der See „kippt“ dadurch nicht so leicht um. Vor allem wird eine P-Remobilisierung aus dem Sediment, die bei Sauerstofffreiheit im Tiefenwasser eintreten kann, unterbunden.

Die Kalkung von Gewässern an sich ist ein altes, vor allem in der Fischereiwirtschaft häufig angewandtes Verfahren zur Regulierung des pH-Wertes und Stabilisierung der Sauerstoff- und Kohlendioxidkonzentration in Fischwässern. Es unterstützt den Abbau der organischen Substanz. Die Kalkung erfolgt bevorzugt im abgelassenen Zustand der Teiche oder bei größeren Gewässern direkt mittels angepasster Ausbringungstechnik über Boote.



Eintrag von Biomasse (Schilf, Laub), ein zu hoher Fisch- oder Vogelbesatz sowie Abwasserprobleme fördert die Eutrophierung

Bodenansprache, Bodenprobenahme und Schnelltests

Bodenansprache und Spatenprobe

Die Spatenprobe erlaubt mit geringem Aufwand Aussagen über den Gefügestand eines Bodens, zeigt vorhandene Bodenverdichtungen und die Durchwurzelungstiefe auf. Sie liefert einen Gesamteindruck, der als sofortige Entscheidungshilfe für praktische Bewirtschaftungsmaßnahmen dienen kann.



Spatenprobe



Durchwurzelung



Bodenstruktur

Bei der **Abwurfprobe** sieht man, wie der Boden zerfällt, ob Regenwurmgänge bzw. Feinwurzeln auch noch den Pflugsohlenhorizont durchdringen. Bei Sauerstoffmangel (Stauanässe) kommt es infolge von Verdichtungen zu blaugrau glänzenden Reduktionsflecken im Pflugsohlenbereich. Mit der Bodensonde lassen sich auch Bodenverdichtungen in größeren Tiefen aufspüren und man kann auch beurteilen, mit welchem Gerät man Verdichtungen nachhaltig brechen kann.

Mithilfe der **Auswalzprobe** zwischen den Handflächen (Dicke der Walze im feuchten Zustand) lässt sich die Bodenart einschätzen. Je leichter der Boden (geringer Tonanteil), desto dicker (6 bis 10 mm) wird die Walze. Sande mit geringen Tonanteilen können nicht gewalzt werden.

Einschätzung des Tongehaltes

Bodenart	Tongehalt	Dicke der Walze im feuchten Zustand
Sand	<5 %	Nicht walzbar
Lehmiger Sand	6 – 12 %	6 – 10 mm
Sandiger Lehm	13 – 17 %	4 – 6 mm
Lehm	18 – 25 %	3 – 4 mm
Toniger Lehm	>25 %	1 – 2 mm

Je höher der Tonanteil, desto kittiger der Boden und desto „dünnere“ kann gewalzt werden.

Repräsentative Bodenprobenahme

Aufgrund der Heterogenität von Böden muss versucht werden, einheitliche Teilflächen bezüglich Tiefgründigkeit, Tongehalt (Bodenschwere), Grobporenanteile etc. voneinander abzugrenzen. Für eine Nährstoffanalyse erfolgt die Probeziehung bevorzugt im Herbst nach der Ernte (Oktober, November) oder vor Frühjahrsbeginn (Februar, März). Die letzte Düngerausbringung sollte einen Monat zurückliegen. Da der pflanzenverfügbare Nährstoffvorrat nach der Ernte überprüft werden soll und die Nährstoffdynamik auch von der Bodentemperatur abhängig ist, sollten die Proben immer im gleichen Zeitraum gezogen werden (z. B. November).

Eine repräsentative Durchschnittsprobe sollte aus mindestens 20 Einzelproben bestehen, die aus einer Bearbeitungstiefe von 15 bis 25 cm auf Acker- bzw. 10 cm auf Grünland entnommen werden. Die Einzelproben werden in einem sauberen Gefäß (z. B. Plastikkübel) gesammelt, gut durchgemischt und anschließend in ein wasserbeständiges wasserfestes Kunststoffsäckerl gefüllt und sofort beschriftet. Bei der Standardbodenuntersuchung werden Bodenart, Humusgehalt, pH-Wert sowie die Nährstoffgehalte an Kalium, Phosphat, Magnesium und die wichtigsten Spurenelemente Kupfer, Zink, Mangan und Eisen ermittelt.

Bodenschnelltests

Heute können mobile pH-Wert-Messungen GPS-gestützt die unterschiedlichen pH-Werte einzelner Bodenbereiche messen und auch grafisch aufbereitet am Bildschirm anzeigen. Es gibt aber auch verschiedene Schnelltests zur Ermittlung des pH-Wertes wie den Carbonatstest und den Flockungstest etc.

Methoden zur pH-Wert-Schnell-Messung vor Ort

Für die schnelle Abschätzung des Boden-pH-Wertes am Feld reicht die einfache Methode mit den Farbindikator: Diese beruht auf dem Farbwechsel einer Indikatorlösung oder eines Lackmuspapiers, wobei an einer Vergleichsfarbskala der pH-Wert abgelesen werden kann.

- Boden zerkleinern und in ein Gefäß füllen
- das 5 fache des Bodenvolumens Aqua dest. zugeben
- 1 bis 3 Minuten über Kopf schütteln, abstellen
- pH Streifen in überstehende Flüssigkeit halten
- Farbabgleich zum pH Ablesen



Abb. 22 : pH-Messung in Wasser mit Lackmus-Farbstreifen
Quelle: H. Untertrauner, 2012

pH-Messung mittels Lackmus-Farbstreifen



Hellige pH-Messer

Foto: K&S

Elektronische Geräte beruhen hingegen auf dem elektrochemischen Potenzialunterschied zwischen zwei Elektroden.

Dazu wird der Boden in einem kleinen, verschließbaren Zylinderröhrchen (Reagenzglas) mit destilliertem Wasser, besser aber mit 1/10 normaler KCl oder CaCl_2 -Lösung aufgeschlemmt, bevor dann die Messelektrode eingesteckt wird. Nach einer Minute wird ein temperaturkorrigierter pH-Wert angezeigt.

Eine Aufschlammung mit destilliertem Wasser kann im Vergleich einen um bis zu einem pH-Punkt höheren pH-Wert in der Bodenlösung anzeigen.



Penameter



Elektronische pH-Messung

Was sagt der Carbonat-Test (Kalk-Test)

Der „Carbonatetest“ (auch Kalktest n. Scheibler oder Säurepuffertest genannt) kann im Labor bzw. auch am Feld durch Beträufeln des Bodens mit 10%iger Salzsäure durchgeführt werden. Enthält der Boden Ca-Carbonate, werden diese durch die starke Salzsäure aus ihrer Verbindung mit der schwächeren Kohlensäure ausgetrieben. Ein Aufbrausen zeigt an, dass im Boden freies Calciumcarbonat (CaCO_3) vorhanden ist, welches Säuren abpuffern und die Bodenstruktur vor Säureangriffen schützen kann. Je mehr Kohlensäure ausgetrieben wird, desto höher der Carbonat- bzw. Kalkgehalt.

Der Test ist eine einfache Möglichkeit, um auf schweren Ackerböden zu prüfen, ob die vorhandene Bodenstruktur vor den Angriffen durch Säuren geschützt ist. Unter 1 % freiem CaCO_3 bzw. MgCO_3 im Boden ist meist kein Aufbrausen mehr erkennbar. Der Carbonatetest liefert jedoch noch keine Aussage darüber, wie hoch die Calciumbelegung am Sorptionskomplex ist bzw. wie viel pflanzenverfügbares Calcium in der Bodenlösung vorhanden ist.

Der Test auf „freien Kalk“ ist speziell auf schwereren Ackerböden eine wichtige Ergänzung zum pH-Wert, da dieser nur den momentanen Säurezustand des Bodens feststellt und vorübergehend auch schwanken kann (siehe Leitparameter pH-Wert-Schwankungen im Boden Seite 21). Der „Salzsäuretest“ zeigt also auf, ob neben dem pH-Wert auch die Bodenstruktur in Ordnung ist.

Die Stärke des Aufbrausens zeigt den ungefähren Gehalt an CaCO_3 an.



Carbonatetest mit 10%iger Salzsäure
(Foto: R. Keller)

	CaCO_3-Gehalt
kein Aufbrausen	< 1 %
schwaches, nicht anhaltendes Aufbrausen	1–2 %
deutliches, nicht anhaltendes Aufbrausen	3–4 %
starkes, lang anhaltendes Aufbrausen	5 %

Test zur Abschätzung der Krümelstabilitätstest:

Durch Kalk „stabilisierte Bodenkrümel“ zerfallen im Wasser nicht, sie bleiben stabil. Die Abb. „Flockung und Trübung“ zeigt im ersten Reagenzglas nach dem Aufschütteln mit destilliertem Wasser nach kurzer Zeit wieder eine klare Flüssigkeit über dem abgesetzten Boden, während im dritten Reagenzglas die freien Tonteilchen in der darüberstehenden Flüssigkeit schwimmen und sich nicht absetzen.

Gibt man in das dritte Reagenzglas mit der Trübung eine Brise Branntkalk, dann setzen sich die frei schwimmenden Tonpartikel bereits nach kurzer Zeit durch die Ausflockung von Ton ab und es entsteht eine klare Flüssigkeit über dem abgesetzten Boden. Stabile Bodenaggregate schützen vor Verschlammung.

Das zweite Reagenzglas zeigt noch schwebende organische Teile und nicht adsorbierte Kolloide im Boden.



Flockung und Trübung
Bodentest zur Beurteilung der Aggregatstabilität und der Aktivität der Bodenmikrobiologie

Spezielle Fragen der Kalkung

Die Kalkung erfüllt neben den Hauptaufgaben, wie Abpufferung von Bodensäuren und Verbesserung der Bodenstruktur auch noch andere Funktionen. Dabei tauchen in der Praxis immer wieder spezielle Fragen auf.



Kalkeinsatz in der Stallhygiene

Kalk ist ein preiswertes Mittel zur Stallhygiene in Bezug auf die Reduktion der Keimzahlen, Hygienisierung der Liegeboxen (Euter- und Klauenhygiene), aber auch zur Verbesserung der Stallluft. Schon sehr früh hat man erkannt, dass durch das „Weißeln“ der Stallwände mit Kalkmilch (CaOH_2) auch die Stallluft und damit die Tiergesundheit verbessert werden können.

Schwerpunkt Hygiene

Größere Tierbestände und höhere Tierleistungen erfordern auch eine Verbesserung der Stallhygiene. Erhöhte Zell- und Keimgehalte in der Milch, aber auch Euter- und Klauenprobleme sind oft ein Spiegelbild von der Beschaffenheit der Liegeboxen und dem Laufkomfort in den Stallgassen.

Pathogene Keime wie E.coli, S-Aureus, S.Uberis und andere Mastitiserreger gedeihen bevorzugt auf feuchten Böden und Liegeboxen. Auf einer Kalkstrohmattatze liegen die Tiere trockener und die Euter bleiben sauberer. Durch den teilweisen Austrag aus den Liegeboxen werden die Laufflächen abgestumpft und somit trittsicherer. Auch Fliegen und Ungeziefer werden reduziert.

Aufbau einer Kalkstroh-Liegemattatze

Die Mattatze sollte aus zwei Schichten aufgebaut werden und zwar aus einer etwa 20 cm dicken Unterlage und einer oberen Deckschicht. Die jeweilige Mischung kann mit einem Futtermischwagen hergestellt werden. Die **Unterlage** soll eine feuchtere Konsistenz aufweisen und aus einer Mischung von einem Teil Stroh (auch Sägemehl oder Rindenmulch möglich), vier Teilen kohlensaurem Kalk mikrofein z. B. KSM 90 (= 90 % kleiner als 0,09 mm) und zwei Teilen Wasser bestehen.

Bei einer Neuanlage werden je Liegebox etwa 150 bis 200 kg KSM 90 benötigt. Die nasse Konsistenz der Unterlage ist für die Ausbildung einer stabilen Mattatze wichtig.

Die **Deckschicht**, welche bei Bedarf auch für das „Nachstreuen“ verwendet wird; soll nur leicht feucht sein und dementsprechend aus einer Mischung von etwa einem Teil gehäckseltem Kurzstroh (bessere Urinbindung), zwei bis drei Teilen Kalk und ein bis zwei Teilen Wasser bestehen, d. h. auf etwa 300 kg Stroh kommen 750 kg Kohlensaurer Kalk und 400 l Wasser. Mikrofeiner Kohlensaurer Kalk und Stroh können auch getrennt nachgestreut und bei Bedarf mit Wasser befeuchtet werden. Für die Einstreu von Hochboxen kann theoretisch auch Kohlensaurer Kalk als alleiniges Einstreumittel verwendet werden. In der Praxis wird jedoch bevorzugt eine Mischung mit Stroh oder Sägemehl in einer Aufwandmenge von ca. 0,5 bis 1 kg täglich verwendet.

Kohlensaurer Kalk wird am preiswertesten lose mit dem Kipperzug (27 t) ausgeliefert, wobei auch eine Teilung der Ladung möglich ist. Kohlensaure Kalke haben wie Gülle einen ähnlichen pH-Wert um 7,5, weshalb durch den gemeinsamen Einsatz keine verstärkte Ammoniakabgasung zu erwarten ist. Der Kalkdüngewert bleibt erhalten.

Als stärker hygienisierende Einstreumittel im Liege- und Laufbereich haben sich auch Mischungen aus verschiedenen mineralischen Rohstoffen mit hoch alkalischen pH-Werten von nahezu 12 bewährt. Fertigprodukte wie z. B. Dekamix, Desikal etc. werden auch im Handel angeboten. Im Gegensatz zu Brannt- und Hydratkalken (Löschkalk) erlauben diese Produkte eine einfachere Einstreu.



Kalkstrohmattatze



Einstreu auf Standflächen



Hygienekalk-Einstreu in Ferkel- und Schweineboxen

Einsatz von Güllekalk

Güllekalk ist ein mikrofein vermahlener Kohlensaurer Kalk (< 0,1 mm), welcher mit geringen Mengen feinstvermahlener Naturgips (CaSO_4) vermischt wird. Güllekalk wird mit dem Silo-Lkw unter gleichzeitig intensivem Rühren in die Gülle eingeblasen. Durch die Umhüllung der Kalkteilchen mit der Auflockerungsluft hält sich der Güllekalk, vor allem bei Güllen mit hohen Feststoffanteilen einige Wochen lang in Schwebelage bzw. wird durch die elektrischen Ladungen an Gülleteilchen gebunden. Der Vorteil von Güllekalk ist die gleichzeitige Erhaltungskalkung mit der Gülleausbringung in einem Arbeitsgang. Dies ist vor allem für Berggebiete interessant, wo der Einsatz eines Großflächenstreuers nicht möglich ist.



Einblasen von Güllekalk aus dem Silo-Lkw unter gleichzeitig intensivem Vermischen mit dem Rührwerk

Beachte:

Die Güllekalk-Einblasmengen sollten 20 (bis 25) kg/m^3 Gülle nicht überschreiten. Bei stark verdünnter Gülle mit wenig Feststoffanteilen sollte die Menge unter $20 \text{ kg}/\text{m}^3$ liegen. Für Jauche ist die Einmischung von Güllekalk nicht geeignet.

Wirtschaftsdünger und Kalkausbringung

Immer wieder tritt in der Praxis die Frage auf, ob Kalk und Wirtschaftsdünger gemeinsam ausgebracht werden dürfen.

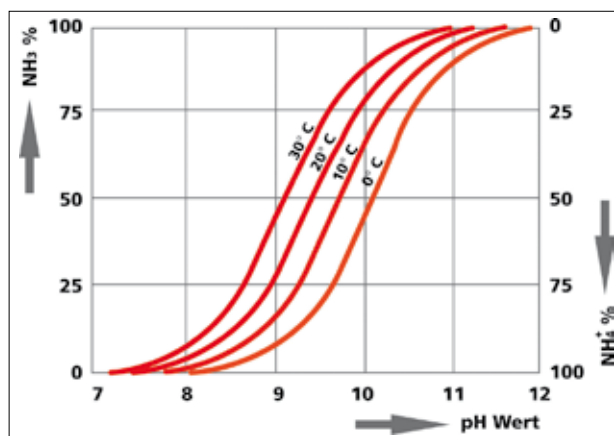
Carbonatisch und silikatisch gebundene Kalke dürfen gemeinsam mit Gülle oder Stallmist ausgebracht werden, da sie den pH-Wert der Wirtschaftsdünger nicht erhöhen. Gebrannte Kalke (Branntkalk, Mischkalk) können hingegen den pH-Wert auf über pH 8 erhöhen, wodurch es in Abhängigkeit von der eingemischten Menge zu einem Verlust von Ammoniumstickstoff infolge von Ammoniakausgasung kommen kann.

Die Ammoniakverluste bei der Ausbringung hängen vom Ammoniumanteil, dem Verdünnungsgrad, dem pH-Wert sowie der Temperatur unmittelbar nach der Ausbringung ab. Wirtschaftsdünger enthalten unterschiedliche Anteile an Ammonium (NH_4) und organisch gebundenem Stickstoff. So enthält Jauche über 90 % Ammonium, Rindergülle etwa 50 % und Stallmist etwa 15 %.

Sie haben einen pH-Wert im Bereich von 7,5 (belüftete Gülle bzw. Biogasgülle bis 8,5). Eine Umwandlung von Ammonium zu Ammoniak und somit Stickstoff-Abgasung beginnt bei pH-Werten über 8,0 und verstärkt bei pH-Werten über 9 (siehe Abb.).



Foto: Froschauer



Ammoniakabgasung in Abhängigkeit von pH-Wert und Temperatur in wässriger Lösung

Vorsicht bei Gülle und Branntkalk bzw. Löschkalk

Branntkalk oder Löschkalk haben einen pH-Wert von über 12, während Kohlensäure Kalke im Neutralbereich um 7,5 liegen. Für Brannt- bzw. auch Mischkalk gilt daher generell der Grundsatz, dass zwischen Kalk- und Wirtschaftsdüngerausbringung eine Einarbeitung liegen oder inzwischen einmal Niederschläge fallen sollten.

Ähnlich verhält es sich bei Ausbringung von **Löschkalk** (Calciumhydroxid = $\text{Ca}(\text{OH})_2$), welcher auch unter der Bezeichnung Kalkmilch, Carbidkalk oder Kalklauge bekannt ist. Bei Verwendung von Flüssigkalk sollte die Gülle vorher ausgebracht werden, um eine Ammoniakabgasung (speziell bei dicker Gülle über 6 % TM) zu vermeiden. Die Güllegrube sollte nur als Zwischenspeicher dienen

Gips oder Kalk

Gips (Calciumsulfat, CaSO_4) ist wasserlöslich und enthält ca. 17 % Schwefel (S) sowie 23 % Calcium (Ca). Gips ist vorrangig als Schwefeldünger bekannt.

Gips ist ein Neutralsatz und kann daher im Vergleich zu Kalk keine Bodensäuren abpuffern und auch den pH-Wert im Boden nicht verändern.

Nur Kalke liefern Basen (OH-Ionen) zur Abpufferung von Bodensäuren und dienen zur Regulierung des pH-Wertes im Boden.

Das Calcium (Ca^{++}) dient hingegen beim Gips ebenso wie beim Kalk als „Mörtel“ für die Brückenbildung zwischen Ton und Humus und damit über die Ton-Humus-Komplexbildung der Verbesserung der Bodenstruktur.

Gips kann zur Düngung von schwefelbedürftigen Intensivkulturen wie Raps, Klee gras, Vielschnittwiesen etc. bei entsprechender Homogenisierung auch über die Güllegrube (20 bis 25 kg/m^3) in einer Menge von 200 bis 400 $\text{kg}/\text{ha}/\text{Jahr}$ bevorzugt im Frühjahr ausgebracht werden kann.

Gips kann bei Böden mit hohen pH-Werten, aber gleichzeitig geringer Ca-Belegung am Sorptionskomplex sowie bei Obst- und Gemüsekulturen durch sein leicht lösliches Calcium die Ca-Versorgung verbessern, ohne dabei den Boden-pH-Wert noch weiter zu erhöhen.

Kalkdüngung bei hohen pH-Werten

Auf Böden, die zur Verschlammung neigen, ist eine leichte Kopfkalkung mit gebrannten Kalken oder (bei hohen pH-Werten) eine Gipsdüngung auf die Krume sinnvoll, damit die Bodenkrume luftdurchlässig gehalten wird. Eine offene Bodenkrume (Bodenstruktur) beeinflusst maßgeblich die Wasserführung und den Gasaustausch zwischen Bodenluft und Atmosphäre.

Auf Carbonatböden mit pH-Werten über 7,5 kann es indirekt zu einem Ca^{++} -Mangel kommen, weil freies Calcium rasch zu schwer löslichem Calciumcarbonat gebunden (festgelegt) werden kann. Speziell im Gemüsebau (Salat) kann dadurch die kurzfristige Calciumversorgung nicht mehr gewährleistet sein. Hier kann zur Abklärung eine Bodenuntersuchung auf wasserlösliches Calcium dienen bzw. der Einsatz von Gips (wasserlöslich bei pH über 6,5) die Versorgung verbessern.

Nach der EUF-Bodenanalyse (Methode der Zuckerindustrie) wird auf tonigen und schluffigen Böden im Bereich unter 40 $\text{mg EUF-Ca}^{++}/100\text{g Boden}$, auf leichten Böden im Bereich unter 30 $\text{mg EUF-Ca}^{++}/100\text{g Boden}$ auch bei hohen pH-Werten noch eine Kalkung empfohlen (siehe auch Düngung mit Calcium, Seite 43).

Winterkalkung – nur auf ebenen Flächen

Die wichtigste Voraussetzung für eine Kalkung im Winter sind ebene Flächen, damit der ausgebrachte Kalk letztlich auf den Boden gelangt und nicht mit der Schneeschmelze abgeschwemmt werden kann. Ein leicht schneebedeckter oder nur leicht angefrorener Boden ist gut befahrbar. Dadurch können auch aus Sicht des Bodenschutzes Bodenverdichtungen vermieden werden.



Feuchtkalk-Ausbringung auf Schneedecke

Bei Schneebedeckung sind nur Kohlensäure Kalke zu empfehlen, da gebrannte Kalke bei zu langem Verbleiben auf der Schneedecke wieder recarbonatisieren können und damit einen Teil ihrer strukturverbessernden Wirkung verlieren.



Winterkalkung mit Kohlensäuren Trockenkalken

Was ist Graukalk

Graukalk ist ein Kohlensäurer Magnesiumkalk mit Kohlenstoffeinschlüssen, welcher die graue Färbung bewirken. Auf den Schnee gestreut, absorbiert Graukalk mehr Wärme und bringt dadurch den Schnee rascher zum Schmelzen (ähnlich dem dunklen Thomasmehl). Der Vorteil dieses Kalkproduktes ist die raschere Schneeschmelze, z. B. bei langer Schneebedeckung auf Wintersaaten.



Schneeschmelzende Wirkung von Graukalk ist bereits nach wenigen Tagen sichtbar

Was ist Algenkalk

Algenkalk ist von der Bindungsform ein carbonatischer, d. h. Kohlensaurer Kalk mit schwankenden Magnesiumanteilen von etwa 5 % $MgCO_3$. Der Kalkanteil (CaO-Gehalt) liegt zwischen 42 bis 48%.

Kalkalgen werden u. a. für pharmazeutische Extraktionen gewonnen, wobei der kalkhaltige Rest zu Granulaten verarbeitet wird.

Aufgrund der marinen Herkunft ist das Produkt mit diversen Begleitstoffen, welche im Meerwasser vorhanden sind, wie z. B. Natrium, ausgestattet.

Meereskalk

Der in Österreich zurzeit unter dem Namen „Meereskalk“ vertriebene, granuliert Kalk entspricht einem carbonatisch gebundenen Kreidekalk mit einem schwankenden Magnesiumcarbonatgehalt um 5 %, welcher hauptsächlich an der Ostsee abgebaut wird. Dieser zu Kreidemehl verarbeitete Rohstoff wird anschließend zu staubfreien Granulaten von 2 bis 5 mm regranuliert und kommt dann in Big-Bag-Form in den Handel.

Der Kalkwert (CaO-Gehalt) liegt bei ca. 48 % und kann staubfrei mit dem eigenen Anbaustreuer ausgebracht werden. Die Löslichkeit von Kreidekalken zu den vergleichbaren kohlensauren Kalken alpiner Herkunft ist aufgrund des speziell im österreichischen DMG vorgeschriebenen strengen Mindestvermahlungsgrades (Reaktivitätsbestimmung) ähnlich.

Welche Düngekalke sind „bio-konform“

Grundsätzlich sind alle natürlichen Kalk- /Dolomitsteinmehle, welche ohne Umweg über einen industriellen Prozess direkt für die landwirtschaftliche Verwendung hergestellt werden, „biotauglich“. Ausgenommen sind Nebenprodukte von industriellen Prozessen (ehemals als Rückstandskalke, heute als Sekundärrohstoffe bezeichnet) mit Ausnahme vom Carbokalk aus der Zuckersaftreinigung.

Nicht zugelassen im Biolandbau sind Branntkalk und dessen Derivate wie Löschkalk, Kalkmilch sowie Mischkalke. Mischprodukte hingegen von natürlichen Kalk-/Dolomitsteinmehlen mit vermahlenden Rohphosphaten oder Naturgipsmehlen sind erlaubt.

Kalkmergel – gibt es auch heute noch

Auch heute werden noch tonhaltige Kalk- und Dolomit-Produkte zur Verbesserung der Bodeneigenschaften von Blumenerden oder als Sorptionsträger von Komposten eingesetzt.

Mikrofeine Carbonatmehle

In den letzten Jahren sind vermehrt diverse (Kalk)-„Mikromehle“, mit Mahlfineinheiten von kleiner 40 µm auf den Markt gekommen. Für die Bodenkalkung haben sie aufgrund des höheren Reinnährstoffpreises und schwierigen Ausbringungweniger Bedeutung. Nachgesagt wird ihnen eine gewisse phytosanitäre Wirkung bei der Blattdüngung. Bezüglich der Stallhygiene haben diese fein vermahlene Kalkmehle aber nicht dasselbe Laugenbildungsvermögen wie ein wasserlöslicher Branntkalk mit pH > 12 und entsprechend auch nicht dieselbe hygienisierende, keimabtötende Wirkung.

Methoden der Kalkbedarfsermittlung

Zur Ermittlung des „Kalkbedarfes“ gibt es mehrere Methoden, wobei in Österreich die Richtlinien für die **SGD** (Sachgerechte Düngung) Anwendung findet. Daneben gibt es die Methode nach der **VDLUFA** (Vereinigung Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten), die **EUF**-Methode (der Zuckerindustrie) und die Bo-WaSan-Husz-Methode (speziell für Bodenmeliorationen).

Bei der SGD wird zur Kalkbedarfsermittlung wird der pH-Wert gemäß ÖNORM L 1083 nach der Calcium-Chlorid-Methode (CaCl₂) gemessen und die Bodenschwere (Tongehalt) nach ÖNORM L 1061-2 bestimmt. Aus dem Tongehalt wird die Bodenart abgeleitet. Liegt der gemessene pH-Wert unterhalb des anzustrebenden pH-Zielwertes, so erfolgt die Kalkbedarfsermittlung zusätzlich unter Einbeziehung der pH-Wertbestimmung mittels Calciumacetat-Lösung (pH-Ac).

Richtlinien für Sachgerechte Düngung (SGD, 2006)

Dabei wird zunächst der pH-Wert gemäß ÖNORM L 1083 in Calciumchlorid (CaCl₂) und die Bodenschwere (Tongehalt) nach ÖNORM L 1061-2 bestimmt. Aus dem Tongehalt wird die Bodenart abgeleitet. Liegt der pH-Wert unterhalb des anzustrebenden pH-Wertes, so erfolgt die Kalkbedarfsermittlung nicht nur nach der CaCl₂-Methode, sondern auch unter Einbeziehung der pH-Bestimmung mittels Calciumacetat-Lösung (pH-Ac). Wie der Kalkbedarf in Abhängigkeit von den beiden pH-Werten korreliert, zeigt nachfolgende Tabelle.

Kalkbedarf in Abhängigkeit von pH (CaCl₂) und pH -Ac: schwere Ackerböden, Ziel – pH 6,5.

pH(CaCl ₂)	t CaO/ha bei		t CaO/ha bei		t CaO/ha bei	
	pH-Ac 6,5	pH(CaCl ₂)	pH-Ac 6,3	pH (CaCl ₂)	pH-Ac 6,1	
6,25	1,06	6,00	2,24	5,75	4,23	
6,00	1,58	5,75	2,69	5,50	4,7	
5,75	1,90	5,50	2,99	5,25	5,03	
5,50	2,11	5,25	3,21	5,00	5,29	
5,25	2,26	5,00	3,37	4,75	5,48	
5,00	2,38	4,75	3,49	4,50	5,64	
4,75	2,46	4,50	3,59	4,25	5,77	
4,50	2,53	4,25	3,67	4,00	5,87	

Beispiel: Ein schwerer Ackerboden hat einen angestrebten **Ziel-pH-Wert von 6,5** (nach der CaCl₂-Methode). Wird nach der CaCl₂-Methode ein pH-Wert von 5,5 gemessen und nach der Azetatmethode 6,5, so ist ein Kalkbedarf von 2,11 t CaO (Reinkalk) erforderlich. Bei einem Azetatwert von pH 6,3 wären es 3,21 t CaO.

Kalkbedarfsbestimmung nach VDLUFA-Methode

Diese erfolgt zunächst über eine schlagbezogene Einstufung in Bodengruppen, sowie eine Einteilung in pH-Klassen, bevor die anzustrebenden pH-Werte und daraus resultierenden Aufwandmengen berechnet werden. Diese Einstufung der Böden in Bodengruppen wird entweder nach dem Tongehalt (in %) oder nach dem Feinanteil (in %) durchgeführt (Details dazu DLG-Merkblatt Kalkdüngung, www.vdlufa.de/index.php).

Kalkbedarfsbestimmung nach der EUF-Methode (Zuckerindustrie)

EUF ist die Abkürzung für Elektro-Ultrafiltration nach dem Prinzip einer Temperatur, Vakuum und elektrischer Spannung unterstützten Wasserextraktion. Bei der EUF-Methode wird der Kalkbedarf nicht über den pH-Wert, sondern direkt über den Calciumgehalt ermittelt. Liegen die Ca-Gehalte der 1. Fraktion (EUF-CI) unter 50 mg/100 g Boden und die Ca-Gehalt der 2. Fraktion (EUF-Ca II) unter 40 mg/100 g Boden, können Kalkungsempfehlungen auf Basis der EUF-Analysen entsprechend der folgenden Gleichung errechnet werden:

$$\text{Kalkbedarf (kg CaO/ha)} = 4400 - 70 \cdot \text{Ca I} - 85 \cdot \text{Ca II} + 80 \cdot \text{Tongehalt in \%}$$

Ergibt sich nach obiger Gleichung ein Bedarf unter 500 kg CaO/ha, wird keine Kalkung empfohlen. Liegt ein Ergebnis über 3 t CaO/ha vor, wird die Obergrenze von maximal 3 t CaO/ha als Empfehlung ausgewiesen.

Bodenmelioration nach der BoWaSan-Husz-Methode

Beim BowaSan-Konzept werden neben den Parametern (pH-Wert, Bodenart, Humusgehalt) serienmäßig die Austauschkapazität des Bodens, Kationenverteilung am Sorptionskomplex, die Basensättigung sowie die wichtigsten Nährstoffe und Spurenelemente ermittelt, um auch die Nährstoffverhältnisse besser beurteilen zu können (siehe Anhang: Tabelle Seite 94).

Mineraldünger – Kalkzehrer und Kalkmehrer

Stickstoff-Dünger						
	N	Schwefel	Kalk-zehrung	physiol. Wirkung	Stickstoffform	
Kalkammonsalpeter/Nitramoncal	27		-13	neutral/ schwach sauer	13,5 % Nitrat + 13,5 % Ammonium	
Ammonium-Nitrat-Harnstofflösung (AHL)	30		-30	sauer	7,5 % Nitrat + 7,5 % Ammonium + 15 % Amid	
Harnstoff/UREA gepulvert od. granuliert	46		-36	sauer	Amid	
Alzon 46 (N-stabilisiert)	46		-36	sauer	Amid mit Nitrifikationshemmstoff	
Ammonsulfatsalpeter/ASS	26	13	-51	sehr sauer	7,5 % Nitrat + 18,5 % Ammonium	
Ammonsulfatsalpeter/ASS	25	12	-50	sehr sauer	7,7 % Nitrat + 17,3 % Ammonium	
Schwefelsaures Ammoniak (Ammonsulfat/SSA), kristallin	21	24	-63	sehr sauer	Ammonium	
Schwefelsaures Ammoniak (Ammonsulfat/SSA), granuliert	20	20,5	-60	sehr sauer	Ammonium	
SULFAN	24	6	-21	sauer	12 % Nitrat + 12 % Ammonium	
ENTECC 26 (N-stabilisiert)	26	13	-49	sauer	7,5 % Nitrat + 18,5 % Ammonium mit DMPP*	
Kalksalpeter 15,5 % N + 26 % CaO	15,5		25	alkalisch	14,9 Nitrat + 0,6 Ammonium	
Kalkstickstoff 20 % N + 50 % CaO	20		30	alkalisch	>15 % Cyanamid + 1,5 % Nitrat NO ₃	
Piamon S 33 + 12 S	33	12	-54	sauer	22,6 % Amid + 10,4 % Ammonium	
Sulfamo 23 N PRO	23	12	13	neutral	11 % Ammonium + 12 % Amid + 13 % CaCO ₃ + 3 MgO	
Sulfamo 30 N PRO	30	6	13	neutral	5 % Ammonium + 25 % Amid + 12,5 % CaCO ₃ + 3 MgO	

Nährstoffgehalt in kg/dt Ware • CaO-Negativwerte = Kalkzehrung, CaO-Positivwerte = Kalkmehrer (in kg/ha) • *Nitrifikationshemmstoff

NP-Dünger									
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	S	Sonstige	Kalk-zehrung	physiolog. Wirkung	Löslichkeit	Stickstoffform
Diammoniumphosphat DAP	18	46	0			-42	sauer	ca. 70 %	NH ₄
Complex 24:14+3S+Cu+Zn	24	14	0	3	Cu, Zn	-33	schwach sauer	85 % H ₂ O-löslich	ca. 1/3 NO ₃ , 2/3 NH ₄
Complex 20:20+3S+Zn	20	20	0	3	Zn	-26	schwach sauer	85 % H ₂ O-löslich	ca. 1/3 NO ₃ , 2/3 NH ₄
Complex 18:25+2S+Zn	18	25	0	2	Zn	-24	sauer	85 % H ₂ O-löslich	ca. 1/3 NO ₃ , 2/3 NH ₄
Entec NP 25/15 (N-stabilisiert)	25	15	0	2		-32	schwach sauer	75 % H ₂ O-löslich	11 % NO ₃ , 14 % NH ₄ mit DMPP*

PK-Dünger										
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	S	Sonstige	Kalk-zehrung	physiolog. Wirkung	Löslichkeit	Eigenschaften	Stickstoffform
DC-45 0:15:30	0	15	30			-1	neutral	80 % H ₂ O-löslich	chloridhaltig >10 %	-
DC-45 neu 0:12:20+8S	0	12	20	8		-1	neutral	90 % H ₂ O-löslich	chloridhaltig >10 %	-
DC-44 0:10:30+3MgO+0,1B+11S	0	10	30	11	3 MgO + 0,1 B	0	neutral	90 % H ₂ O-löslich	50 % Kalisulfat	-
DC Rübe 0:10:30+0,2B+6S	0	10	30	6	0,2B	-1	schwach sauer	90 % H ₂ O-löslich	chloridhaltig >10 %	-
Hyperkali	0	18	18		ca. 35 % CaO	19	basisch	ameisensäurel.	chloridhaltig >10 %	-

NPK-Dünger										
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	S	Sonstige	Kalk-zehrung	physiolog. Wirkung	Löslichkeit	Eigenschaften	Stickstoffform
NPK 15:15:15	15	15	15	2**		-22	schwach sauer	80 % H ₂ O-löslich	chloridhaltig >10%	ca. ½ NO ₃ , ½ NH ₄
Complex 14:10:20+4S	14	10	20	4		-23	schwach sauer	85 % H ₂ O-löslich	chloridhaltig >10%	ca. ½ NO ₃ , ½ NH ₄
Complex 20:8:8+3MgO+4S	20	8	8	4	3 MgO	-26	schwach sauer	70 % H ₂ O-löslich	chloridhaltig >10%	ca. ½ NO ₃ , ½ NH ₄
Complex 12:12:17+2MgO+5S+Zn+B	12	12	17	5	2 MgO, Bor, Zn	-23	schwach sauer	85 % H ₂ O-löslich	minderchlorid <10 %	ca. ½ NO ₃ , ½ NH ₄
Complex 15:5:18+2,5MgO+10S+Zn+B	15	5	18	10	2,5 MgO, Bor, Zn	-31	schwach sauer	80 % H ₂ O-löslich	chloridarm <2 %	ca. ½ NO ₃ , ½ NH ₄
NPK 20:10:10	20	10	10	3**		-25	schwach sauer	80 % H ₂ O-löslich	chloridhaltig >10%	ca. ½ NO ₃ , ½ NH ₄
NPK 20:6:11	20	6	11	3	0,02 % Bor	-19	schwach sauer	80 % H ₂ O-löslich	chloridhaltig >10%	ca. ½ NO ₃ , ½ NH ₄
Entec perfekt (N-stabilisiert)	14	7	17	8	2 MgO, Bor, Zn	-18	schwach sauer	80 % H ₂ O-löslich	chloridarm <2 %	6 % NO ₃ , 8 % NH ₄ mit DMPP*
Entec Vino (N-stabilisiert)	15	5	20	8	2 MgO, Bor, Zn	-13	schwach sauer	70 % H ₂ O-löslich	chloridarm <2 %	5 % NO ₃ , 7 % NH ₄ mit DMPP*
Nitrophoska perfekt	15	5	20	8	2 MgO, Bor, Zn	-14	schwach sauer	70 % H ₂ O-löslich	chloridarm <2 %	7 % NO ₃ , 8 % NH ₄
Nitrophoska spezial	12	12	17	8	2 MgO, Bor, Zn	-14	schwach sauer	65 % H ₂ O-löslich	chloridarm <2 %	5 % NO ₃ , 7 % NH ₄
DC-Bor-Start 6:10:16+10S+0,1B	6	10	16	10	0,1 % Bor	-16	sauer	90 % H ₂ O-löslich	chloridhaltig >10%	NH ₄
DC-37 12:10:15+12S	12	10	15	12		-39	sauer	90 % H ₂ O-löslich	chloridhaltig >10%	NH ₄
DC 16:5:7+14S	16	5	7	14		-25	schwach sauer	90 % H ₂ O-löslich	chloridhaltig >10%	NH ₄
DC-Rot 10:8:20+15S+0,1B	10	8	20	15	Bor	-43	sauer	90 % H ₂ O-löslich	minderchlorid <10 %	NH ₄
DC-Frucht 12:5:15+18S	12	5	15	18		-24	sauer	90 % H ₂ O-löslich	chloridarm <2 %	NH ₄

Nährstoffgehalt in kg/dt Ware • CaO-Negativwerte=Kalkzehrung, CaO-Positivwerte=Kalkmehrung • *Nitratfester Stickstoff • **bei Schwefelanteil kann in punkto Herkunft/Produktion variieren

Phosphatdünger					
	P ₂ O ₅	Sonstige	Kalkzehrung	physiolog. Wirkung	Löslichkeit
Naturphosphat 26 %	26	ca. 40% CaO	28	basisch	ameisensäurelöslich
Superphosphat 18 % + 12 S	18	12 % S	-1	leicht sauer	93 % wasserlöslich
Triple-Superphosphat 45 %	45		-3	leicht sauer	93 % wasserlöslich
Hyperkorn 26 %	26	ca. 40% CaO	28	basisch	ameisensäurelöslich
Hyperphosphat mehlflein 29 %	29	ca. 40% CaO	31	basisch	ameisensäurelöslich
Dolophos 15 gran.	15	> 40% CaO	28	basisch	ameisensäurelöslich
Dolophos 26 gran.	26	> 40 % CaO	28	basisch	ameisensäurelöslich
(Ma)Kaphos	5 bis 15	0-10 %MgO > 40 % CaO	36	basisch	ameisensäurelöslich
Physio Mescal G 18	18	5 % MgO + 65 %CaCO ₃	32	basisch	ameisensäurelöslich

Nährstoffgehalt in kg/dt Ware • CaO-Negativwerte=Kalkzehrung, CaO-Positivwerte=Kalkmehrung

Kalidünger/Magnesiumdünger					
	K ₂ O	MgO	Sonstige	physiolog. Wirkung	Eigenschaften
Korn-Kali 40 %	40	6	3 % Na + 4 %S	neutral	chloridhaltig >10 %
Kali 60 % granuliert	60			neutral	chloridhaltig >10 %
Patentkali 30 % granuliert	30	10	17 % S	neutral	minderchloridhaltig <10 %
Kalisop 50 % granuliert	50		18 % S	neutral	chloridarm <2 %
Magnesia Kainit	11	5	20 % Na+ 4 % S	neutral	chloridhaltig >10 %
ESTA Kieserit		25	20 % S	neutral	-
Epsom Top (Bittersalz)		16	13 % S	neutral	-
Epsom Combitor (Bittersalz)		13	12 % S, 1 % Zn, 4 % Mn	neutral	-
Epsom Microtop (Bittersalz)		15	12 % S, 0,9 B, 1 % Mn	neutral	-

Nährstoffgehalt in kg/dt Ware • Nährstoffgehalt in kg/dt Ware

Literatur

- Blume H. P.**, Handbuch des Bodenschutzes, Ecomed-Verlag, 1992
- Blasi S., Bachler W.**, pH-bedingte Pflanzentoxizität, Die Bodenkultur, 33. Band, 1982.
- Düngekalk-Leitfaden**, Drei Kronen Druck und Verlag GmbH, Efferen, 1965
- Finck A.**, Dünger und Düngung, Ulmer Verlag, 1991
- Galler J.**, Lehrbuch Umweltschutz, Fakten-Kreisläufe-Maßnahmen, Ecomed-Verlag, 1999
- Galler J.**, Eutrophierung – Ursachen und Maßnahmen, Beratungsbroschüre, LK-Salzburg, 2013
- Eichinger M, Bruckmüller O.**,
60 Jahre Waldbodenkalkung im Habsburg-Lothringschen Gut Persenbeug, HLWU-Yspertal, 2012
- Eisenhut M.**, 1982: Bodenfibel. Leopold Stocker Verlag, Graz-Stuttgart
- Fachbeirat für Boden, Fruchtbarkeit und Bodenschutz**, 2006: Richtlinien für die sachgerechte Düngung, Anleitung zur Interpretation von Bodenuntersuchungsergebnissen in der Landwirtschaft, 6. Auflage. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien. [online] URL: http://oebg.boku.ac.at/files/rl_sgd.pdf, 1. 2. 2012
- DLG-Merkblatt Hinweise zur Kalkdüngung** 3. überarbeitete Auflage, 2009 (Stand 01/2009)
- Hagen T.**, Kalkwert von Düngemitteln - eine Bewertung von Düngersystemen,
Vortragsveranstaltung der DHG, Feber 2008, Industrieverband Agrar
- Hege U.**, et al. Pflanzliche Erzeugung – Grundlagen, BLV Buchverlag GmbH & Co KG, München, 2006
- Klapp E.**, Lehrbuch des Acker- und Pflanzenbaus Verlag Paul Parey, Berlin und Hamburg, 1967
- Schröder D.**, Bodenkunde in Stichworten, Verlag Ferdinand Hirt, CH-6314, 1988
- Leitfaden für die Düngung von Acker- und Grünland**, LFL, 9. Auflage, 2011
- Meyer B.**, Bodenkunde – Aspekte und Grundlagen, Eigenverlag Universität Göttingen, Institut für Bodenkunde, 1974
- Tegethoff W.**, Calciumcarbonat - Von der Kreidezeit ins 21. Jahrhundert, Birkhäuser Verlag, Basel/Boston/Berlin, 2001
- Kalk-Taschenbuch**, Bundesverband der Deutschen Kalkindustrie, 65. Auflage
- Kerschberger M., Franke G.**, Düngung in Thüringen nach „Guter fachlicher Praxis“, Schriftenreihe der Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft, Heft 11/2001
- König V. und Kerschberger M.**, Wieviel Kalk braucht das Grünland?, Neue Landwirtschaft, Berlin, 1999, DHG, 1996:
- Naturkalk – Grundlage der Bodenfruchtbarkeit**, 8116/14. DHG Köln, 1996
- Schechtner G.**, Wirksamkeit der Kalkdüngung auf Grünland, BAL Gumpenstein, Sonderdruck 1993
- Schmidt M.**, Kalkdüngung, DLG-Verlag 2013
- Rex M.**, Arbeitsgemeinschaft Hüttenkalk, Leistungsfähige Düngekalke zur Bodenverbesserung einsetzen, 1990
- VDLUVA-Standpunkt**, Bestimmung des Kalkbedarfes von Acker- und Grünlandböden, Darmstadt 2005
- Yara**, Effizient Düngen, 2. Auflage

Schlagwortverzeichnis

Aggregatgefüge (auch „Krümelgefüge“) – Zusammenballung von Bodenteilchen durch bodenbiologische Prozesse; Stabilisierung der Aggregate durch Stützsubstanzen wie CaCO_3 (als Kittgefüge), Beispiel: humoser Gartenboden.

Anionen sind negativ geladene Mineralstoffe. Für die Pflanzenernährung wichtige austauschbare Anionen sind Phosphat- (PO_4^{3-}), Sulfat- (SO_4^{2-}), Nitrat- (NO_3^-) und Chlorid (Cl^-).

Austauscher sind Bodenpartikel vorwiegend $< 2 \mu\text{m}$, die Ionen adsorbieren und austauschen können.

Austauschkapazität KAK - AAK ist die Summe der austauschbaren Kationen der mineralischen und organischen Bodensubstanz. Die Gesamtmenge an Ionen, die ein Boden austauschbar gebunden hält, nennt man seine Austauschkapazität (AK). Die Austauschkapazität für Kationen (KAK) macht den weit überwiegenden Teil der austauschbaren Ionen aus. Die Austauschkapazität für Anionen (AAK) ist viel geringer als die für Kationen. Für die Pflanzenernährung wichtige austauschbare Anionen sind Phosphat- (PO_4^{3-}), Sulfat- (SO_4^{2-}), Nitrat- (NO_3^-) und Chlorid-Ionen (Cl^-). Die beiden Letztgenannten werden nur sehr schwach gebunden und daher leicht ausgewaschen. Das gilt im abgeschwächten Maß auch für das Sulfation.

Basensättigung Die Kationen Calcium, Magnesium, Kalium und Natrium werden als basische Kationen (Basen) bezeichnet. Ihren prozentualen Anteil an der Austauschkapazität bezeichnet man als Basensättigung. Von Böden mit hoher Basensättigung spricht man, wenn der Anteil basischer Kationen mehr als 70 %, von geringer, wenn der Anteil weniger als 30 % beträgt. Werden dem Boden von außen Ionen zugeführt (z. B. durch Säuren oder Düngesalze), so wird ein Teil der sorbierten Ionen ausgetauscht.

Basizität, Alkalität – Maß für die Fähigkeit einer chemischen Verbindung, Protonen aufzunehmen, also ihr Basenverhalten, ausgedrückt durch die Basenkonstante bzw. den pK_B -Wert.

Biogasgüllen entstehen nach der Fermentation nachwachsender Rohstoffe, Wirtschaftsdünger und organische Reststoffe (Speisereste, Fettabfälle, Schlachtabfälle, etc.) neben Biogas, welches als Energieträger verwendet wird, fällt ein flüssiger gülleähnlicher Gärrest an. In Abhängigkeit von den eingesetzten Ausgangsmaterialien wird dieser Fermentationsrückstand als Biogasgülle oder Gärrückstand bezeichnet.

Boden ist der oberste, im Regelfall belebte Teil der Erdkruste. Nach unten wird der Boden von festem oder lockerem Gestein begrenzt, nach oben meist durch eine Vegetationsdecke.

Bodenwasser Sättigt man den Boden vollständig mit Wasser (Porenvolumen = Wasservolumen) und entzieht ihm dann das Wasser stufenweise mit bekanntem Unterdrücken (Bodenwasserspannung), lassen sich nacheinander die weiten und die engen Grobporen, die Mittelporen und die Feinporen entwässern.

Bodenfruchtbarkeit ist ein komplexer Ausdruck für alle das Pflanzenwachstum bzw. die Biomasseproduktion beeinflussenden Faktoren. Sie kann durch acker- und pflanzenbaulichen Maßnahmen verbessert werden.

Bodengare ist Idealzustand eines fruchtbaren Bodens. Ein garer Boden ist krümelig, humos, gut durchlüftet, ausreichend feucht und leicht durchwurzelbar. Er zeichnet sich durch ein stabiles, belastbares Gefüge aus und kann mit der Spatendiagnose erkannt werden. Wie ein „gärender“ Brotteig enthält ein garer Boden viele kleine und mittlere Hohlräume, die sogenannten Bodenporen, die der Luftführung und Wasserspeicherung dienen. Wie ein Schwamm kann dieser Boden z. B. Niederschläge aufsaugen und Überschüsse ins Grundwasser ableiten.

Bodenleben Als Bodenlebewesen bezeichnet man die Gesamtheit der im Boden lebenden Organismen. Die Bodenlebewesen werden unterschieden in die pflanzliche Bodenflora und die tierische Bodenfauna. Im Boden leben zahlreiche ein- oder wenigzellige Mikroorganismen. Zu ihnen gehören neben pflanzlichen und tierischen Arten unter anderem auch Pilze.

Bodenluft ist der gasförmige Teil des Bodens. Die Räume zwischen den festen Bodenpartikeln sind, sofern sie kein Wasser enthalten, mit Luft gefüllt. Diese Gasphase steht entweder im Kontakt mit der Erdatmosphäre oder sie ist von Festteilchen und Wasser eingeschlossen. Bodenverdichtungen durch z. B. immer größere Maschinen reduzieren den Grobporenanteil. Für den Gasaustausch, Wasserspeicherung bzw. Versickerung sind vor allem die Grobporen wichtig.

Boden-Melioration sind alle Maßnahmen, welche einem degradierten, kranken Boden helfen wieder fruchtbar zu werden. Wichtig ist sowohl bei versauerten als auch strukturgeschädigten Böden die Meliorationskalkung.

C/N-Verhältnis Kohlenstoff-Stickstoff-Verhältnis im Boden. Je enger das Kohlenstoff-Stickstoff-Verhältnis (C/N) ist, desto mehr Stickstoff ist in der organischen Substanz. In der frisch abgestorbenen Substanz ist das C/N-Verhältnis weit. Durch den Abbau im Boden verengt sich das C/N-Verhältnis allmählich zu einem Wert von 8 bis 10:1, wie er für den Humus fruchtbarer,

landwirtschaftlich genutzter Böden typisch ist. Für die überschlägige Berechnung des Stickstoffgehaltes spielen der Humusgehalt und die Mächtigkeit des A-Horizontes eine Rolle. Dabei kann von einem Stickstoffgehalt in Höhe von 1/17 des Humusgehaltes und einem Gewicht des Krumbodens von 1.500 t/10 cm Bodenschicht ausgegangen werden. Unter unseren Klimaverhältnissen wird damit gerechnet, dass im Ackerland jährlich etwa 1 bis 2 % des organisch gebundenen Stickstoffs der Krume umgesetzt und damit pflanzenverfügbar werden (= Stickstoffnachlieferung des Bodens).

Dolomit ist ein Karbonat-Gestein, das zu mindestens 90 Prozent aus dem Mineral Dolomit (chemische Formel $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ („ $\text{CaCO}_3\text{-MgCO}_3$ “) besteht. Bei geringeren Gehalten an Dolomit liegt ein dolomitischer Kalkstein vor. Dolomitstein ist im Idealfall weiß, häufig aber elfenbeinfarben, hellgrau, graugelb oder grüngrau.

ebod österreichische elektronische Bodenkarte: <http://gis.lebensministerium.at/ebod>

Fällung – davon spricht man, wenn Produkte in einem Lösungsmittel gelöst vorliegen und mindestens ein Produkt in diesem Lösungsmittel un- oder schwer löslich ist. Das Produkt mit schlechter Löslichkeit fällt aus, die Ausfällung wird allgemein Niederschlag genannt.

Frostgare ist die Bezeichnung für eine Bodenstruktur, die durch Frosteinwirkung in feinkörnigen Sandböden entsteht.

Huminstoffe sind hochmolekulare Stoffe des Humusbodens, welche eine uneinheitliche (amorphe), makromolekulare Struktur aufweisen. Sie sind das erste halbwegs stabile, dunkel gefärbte Aufbauprodukt aus toter Biomasse.

Humus ist die Gesamtheit der toten organischen Substanz eines Bodens bzw. ein Teil der gesamten organischen Bodensubstanz.

Ionen sind elektrisch geladene Atome oder Moleküle. Sie haben im neutralen Zustand genau so viele Elektronen wie Protonen.

Ionentausch ist der Vorgang, bei dem gelöste Ionen durch andere Ionen gleicher Ladung ersetzt werden. Die Nährstoffabgabe erfolgt durch einen Austausch von Ionen, z. B. 1 Calciumion (Ca^{++}) gegen 2 Ionen Wasserstoff (H^+). Durch Nährstoffentzug oder Auswaschung vermindert sich nicht die Menge der im Boden gebundenen Ionen, aber ihr Verhältnis zueinander. Die Gesamtmenge an Ionen, die ein Boden austauschbar gebunden hält, nennt man seine Austauschkapazität (AK). Dabei machen die Kationen (KAK) den überwiegenden Teil der austauschbaren Ionen aus. Die wichtigsten austauschbaren Kationen sind Calcium, Magnesium (Mg^{++}), Kalium (K^+) und Natrium (Na^+). Mit zunehmender Bodenversauerung treten an ihre Stelle Wasserstoff und Aluminium (Al^{+++}). Für den Stickstoffhaushalt der Böden ist es wichtig, dass auch das Ammonium-Ion (NH_4^+) sorbiert und damit vor Auswaschung geschützt wird. Die Austauschkapazität für Anionen (AAK) ist viel geringer als die für Kationen. Für die Pflanzenernährung wichtige austauschbare Anionen sind die Phosphat- (PO_4^-), Sulfat- (SO_4^-), Nitrat- (NO_3^-) und Chlorionen (Cl^-). Die beiden Letztgenannten werden schwach gebunden und daher leicht ausgewaschen. Das gilt im abgeschwächten Maß auch für das Sulfation.

Kalke sind Sedimentgesteine, die ganz überwiegend aus Calciumcarbonat (CaCO_3) in Form der Mineralien Calcit und Aragonit bestehen. In mehr oder minder schwankenden Anteilen kommen Tonminerale, Dolomit ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), Quarz und Gips vor.

Calcium zählt zu den Erdalkalimetallen. Calcium kommt nur in gebundener Form als Bestandteil von Mineralien vor. Zu diesen Mineralien gehören z. B. Kalkstein (auch Marmor), Kreide und Gips.

Kationen sind positiv geladene Teilchen. Calcium, Magnesium, Kalium und Natrium werden als basische Kationen (Basen) bezeichnet.

KH-Wert ist die Wassermenge, die ein Boden maximal aufnehmen kann (vereinfachtes Maß für die Bodenschwere und Wasserkapazität).

Kohärentgefüge Ton- /Schluff-/ Lehmsedimente werden durch Kohäsionskräfte zusammengehalten.

Kolloide sind grob verteilte Bodenteilchen, welche überwiegend negativ geladen sind. Dadurch binden sie vorwiegend Kationen und nur weniger Anionen. Aufgrund der geringen Bindungskapazität der Bodenkolloide bei Anionen liegen die Anionen vermehrt in Lösung und können leichter ausgewaschen werden. Es erfolgt aber ein stetiger Nachschub aus der flüssigen Phase des Bodens. Die Bodenkolloide fungieren also als Ionenspeicher.

Kreide ist ein nur gering verfestigtes Sedimentgestein. Es handelt sich dabei um eine weichere, weniger verdichtete Form aus weißem oder hellgrauem Kalk. Sie ist durch Ausfällung von Kohlensäure aus dem Meer entstanden und wieder zu Kalk (CaCO_3) ausgefällt worden.

Krümelbildung Huminstoffe sind in der Lage, einzelne Bodenpartikel zu einer Krümelstruktur zu verbinden und damit das Bodengefüge zu stabilisieren. Solche Aggregatgefüge werden aus Tonkolloiden durch die Verbindung von Calciumbrücken mit Huminstoffen in humosen Oberböden gebildet.

Lebendverbauung Bodenteilchen können von kettenförmigen organischen Makromolekülen wie Polysacchariden oder mikrobiellen Stoffwechselprodukten sowie von Bakterienkolonien, Pilzhypen und Haarwurzeln netzartig umspannt und miteinander verklebt werden. Dieser Prozess heißt Lebendverbauung und führt zur Krümelbildung. Krümel sind sehr wichtig für die natürliche Bodenfruchtbarkeit.

Löß ist ein vom Wind transportiertes und auch vom Wind abgelagertes Sediment, das aus Feinmaterial – vor allem aus Schluff – besteht.

Marmor ist ein metamorphes Kalkgestein, das durch Umwandlung (Metamorphose) von Kalkstein und anderen carbonatreichen Gesteinen entsteht, und zwar im Erdinneren durch Hitze und Druck.

Mergel enthält sowohl Kalk als auch silikatische Bestandteile meist kleinerer Korngrößen (Ton und/oder Schluff). Größeres Material (Sand und Kies) kann aber auch vorhanden sein. Bei höheren Kalkgehalten spricht man von Kalkmergel, bei hohem Tongehalt von Tonmergel.

Mineralboden ist der Teil eines Bodens, der sämtliche mineralischen Horizonte unterhalb einer evtl. vorhandenen organischen Auflage und oberhalb des Ausgangsgesteins umfasst.

NW-CaO-Kalkwert ist das Maß für das Neutralisierungspotenzial und wird ausgedrückt durch die Menge an Säure, die von der Mengeneinheit Düngekalk neutralisiert werden kann.

Photosynthese ist die Erzeugung von energiereichen Stoffen (z. B. Zuckern) aus energieärmeren Stoffen mithilfe von Lichtenergie durch lichtabsorbierende Farbstoffe (meistens Chlorophyll). Aus energiearmen, anorganischen Stoffen, hauptsächlich Kohlenstoffdioxid CO_2 und Wasser H_2O , werden dabei energiereiche organische Verbindungen – Kohlenhydrate – synthetisiert.

pH-Wert Der pH-Wert ist ein Maß für den Säuregrad (Azidität) eines Bodens.

Porenvolumen ist das gesamte, mit Luft oder Wasser gefüllte Hohlraumvolumen des Bodens. Es teilt sich auf in Primärporen, die von der Korngrößenverteilung der mineralischen Substanz sowie auch von Art und Zusammensetzung der organischen Bestandteile (Humus) abhängen, und in die Sekundärporen, die vom Bodengefüge und damit von chemischen Eigenschaften der Minerale, vom Einfluss der Pflanzen (Wurzeln bilden Wurzelröhren) und Tiere (bilden Gänge, graben, durchmischen) abhängen. Sättigt man den Boden vollständig mit Wasser auf (Porenvolumen = Wasservolumen) und entzieht ihm das Wasser stufenweise mit bekannten Unterdrücken (Bodenwasserspannung), dann lassen sich nacheinander die weiten und die engen Grobporen, die Mittelporen und die Feinporen entwässern.

Protonen sind stabile, elektrisch positiv geladene Kernteilchen. Das Proton gehört neben dem Neutron und dem Elektron zu den Bausteinen, aus denen die Materie besteht.

Puffersysteme Puffer im Boden sind organische und anorganische Verbindungen, die H^+ -Ionen aufnehmen können und damit eine saure Reaktion oder einen sauren Eintrag abschwächen.

Segregatgefüge entstehen durch Austrocknungs- und Schrumpfungsvorgänge aus feinkörnigen Kohärentstrukturen als Besonderung – Beispiel: lehmiger Unterboden.

Soptionskomplex umfasst alle sorptionsfähigen Stoffe des Bodens: Huminstoffe, Tonminerale, Sesquioxide

Ton/Schluff-Trennung Wenn die Kittsubstanz Kalk im Boden fehlt, kommt es nicht nur zum Einwaschen der feinen dispergierten Tonteilchen in die wasserführenden Poren und damit zur Verstopfung, sondern vor allem zu Verdichtungen im Unterboden, welche als Sperrschicht jeden Gas- und Wasseraustausch und ein ungehindertes Wurzelwachstum behindern.

Tonflockung Anlagerung von positiv geladenen Kalzium- und Magnesiumionen an die negativ geladenen Tonteilchen und Huminsäuren.

Ton-Humus-Komplex bezeichnet die Aggregatbildung von organischen Fragmenten wie Huminstoffen mit anorganischen Partikeln wie Tonmineralen. Sowohl Tonminerale als auch Huminstoffe sind Bodenkolloide. Huminstoffe sind in der Lage, einzelne Bodenpartikel zu einer Krümelstruktur zu verbinden und damit das Bodengefüge zu stabilisieren. Solche Aggregatgefüge werden aus Tonkolloiden durch die Verbindung von Calciumbrücken mit Huminstoffen in humosen Oberböden gebildet. Die entstehenden organo-mineralischen Verbindungen werden als Ton-Humus-Komplex bezeichnet.

Tonminerale sind Minerale, die überwiegend feinstkörnig (Korngröße $< 2 \mu\text{m}$) vorkommen.

BÖHMISCHE MASSE

- Granulit, Gföhler Gneis
- Granit
- Orthogneis, Migmatit
- Paragneis, Glimmerschiefer, Marmor, Amphibolit

TERTIÄRE BECKEN

- Vulkanite (Miozän, Pliozän)
- Klastische Sedimente (Kies, Sand, Ton) der Molassezone und der inneralpinen Becken
- Subalpine (verformte) Molassezone

HELVETIKUM

- Mesozoische bis alttertiäre Sedimentgesteine

PENNINIKUM

- Flyschzone (Kreide - Alttertiär) inklusive penninischer Klippen
- Bündnerschiefer-Gruppe (Jura - Alttertiär) mit Ophiolithen
- Permotriadische Sedimente, metamorph
- Zentralgneis
- Altkristallin und metamorphe paläozoische Sedimentgesteine

OSTALPIN

Mesozoikum der Nördlichen Kalkalpen und Äquivalente

- Gosau-Gruppe
- Kalk, Dolomit, Mergel und klastische Sedimentgesteine

Paläozoikum

- Sedimentgesteine und Vulkanite, z.T. metamorph

Permomesozoikum, metamorph

- Klastisch/karbonatische Sedimentgesteine

Ostalpines Kristallin

- Orthogneis
- Paragneis, Glimmerschiefer
- Amphibolit
- Quarzphyllit, Glimmerschiefer, Paragneis

PERIADRIATISCHE INTRUSIVEN

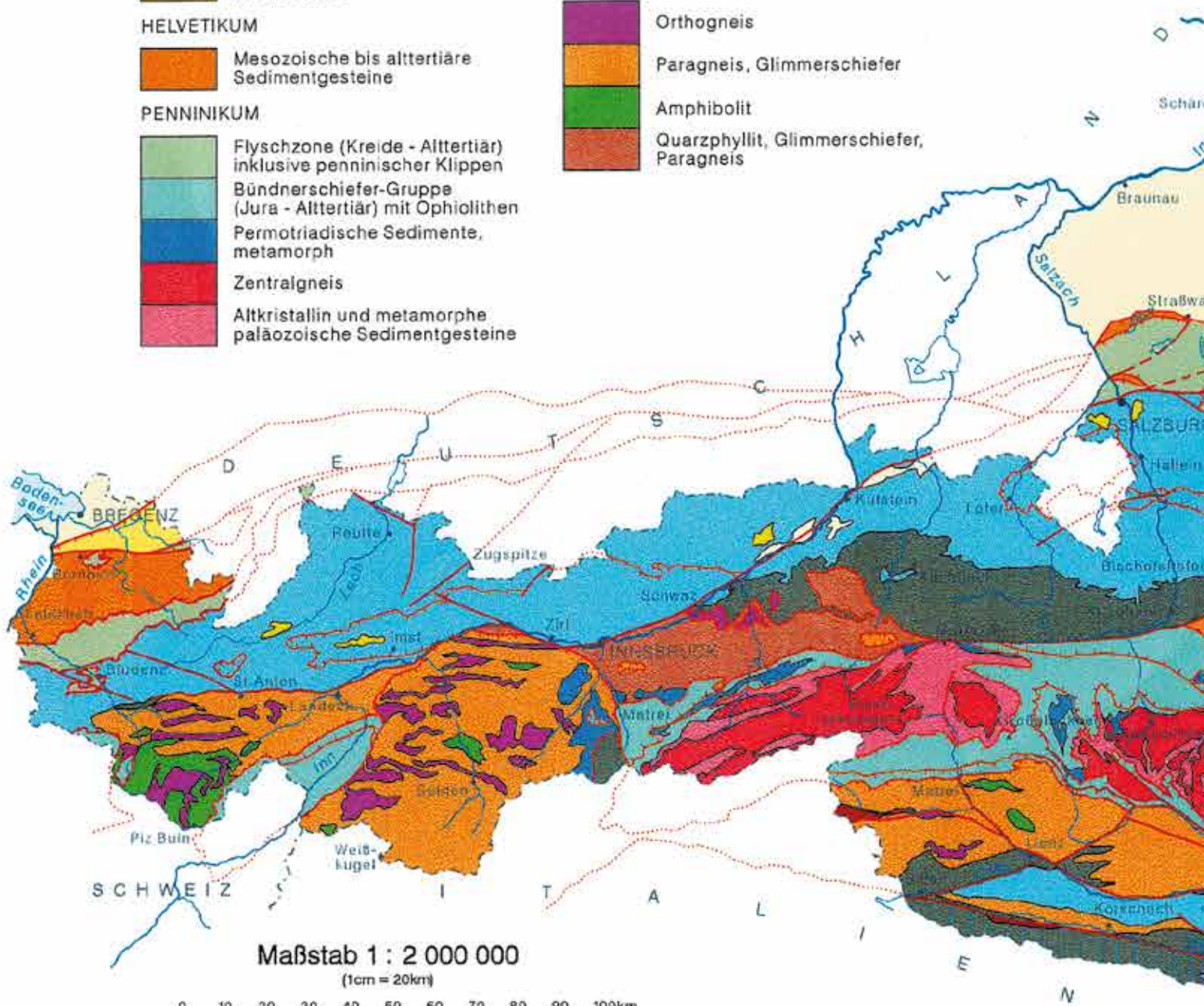
- Magmatite (O

SÜDALPIN

- Mesozoische Sedimentges

- Deckengrenz

- Bruch, Störur



Maßstab 1 : 2 000 000

(1cm = 20km)

0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100km

Topographie nach der ÖK 500 des Bundesamtes für Eich- und Vermessungswesen in Wien.



BRUSIVA
(ligozän)

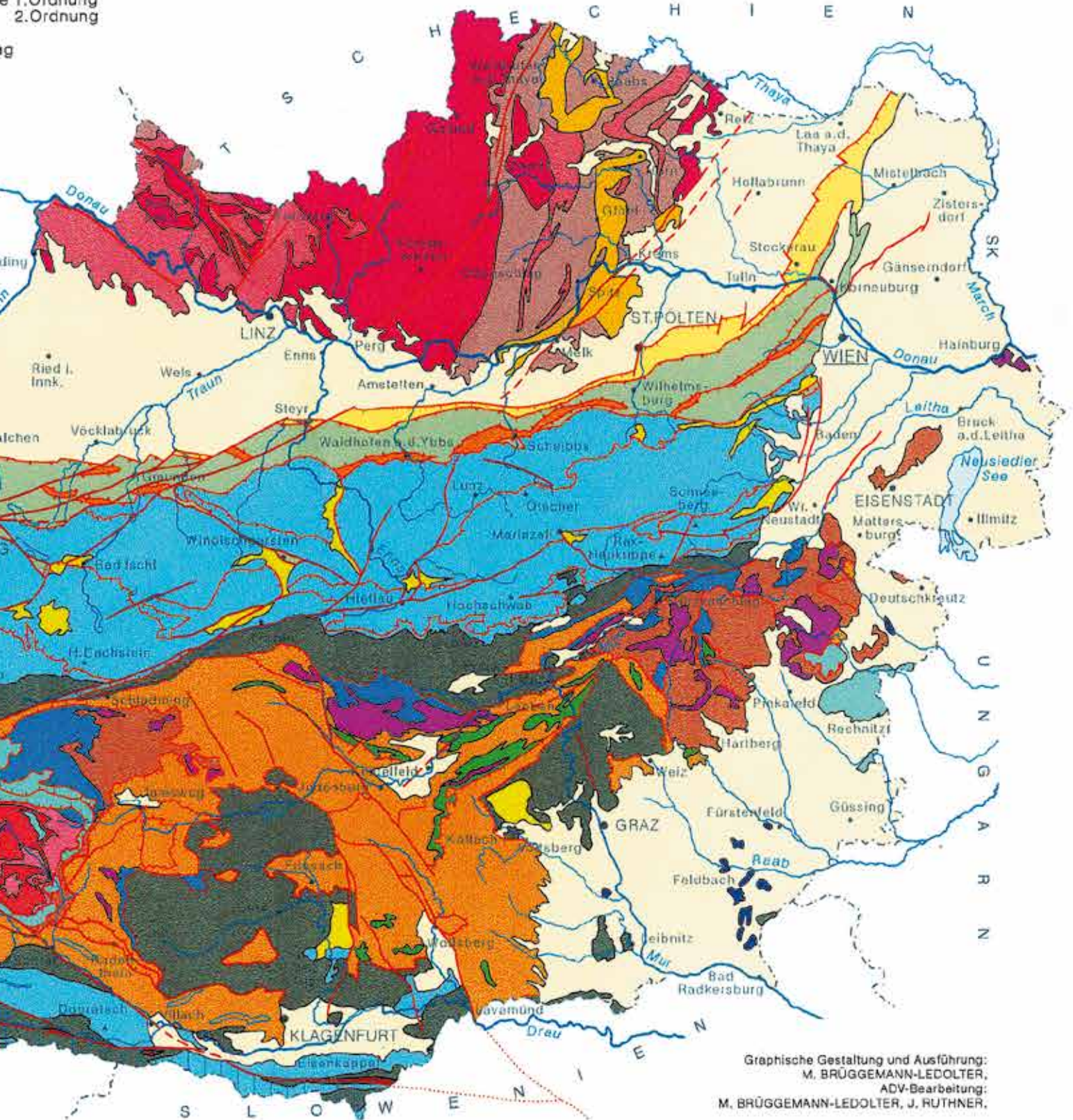
und paläozoische
feine und Vulkanite

1. Ordnung
2. Ordnung

GEOLOGISCHE ÜBERSICHTSKARTE ÖSTERREICH

Herausgegeben von der Geologischen Bundesanstalt, Wien 1999

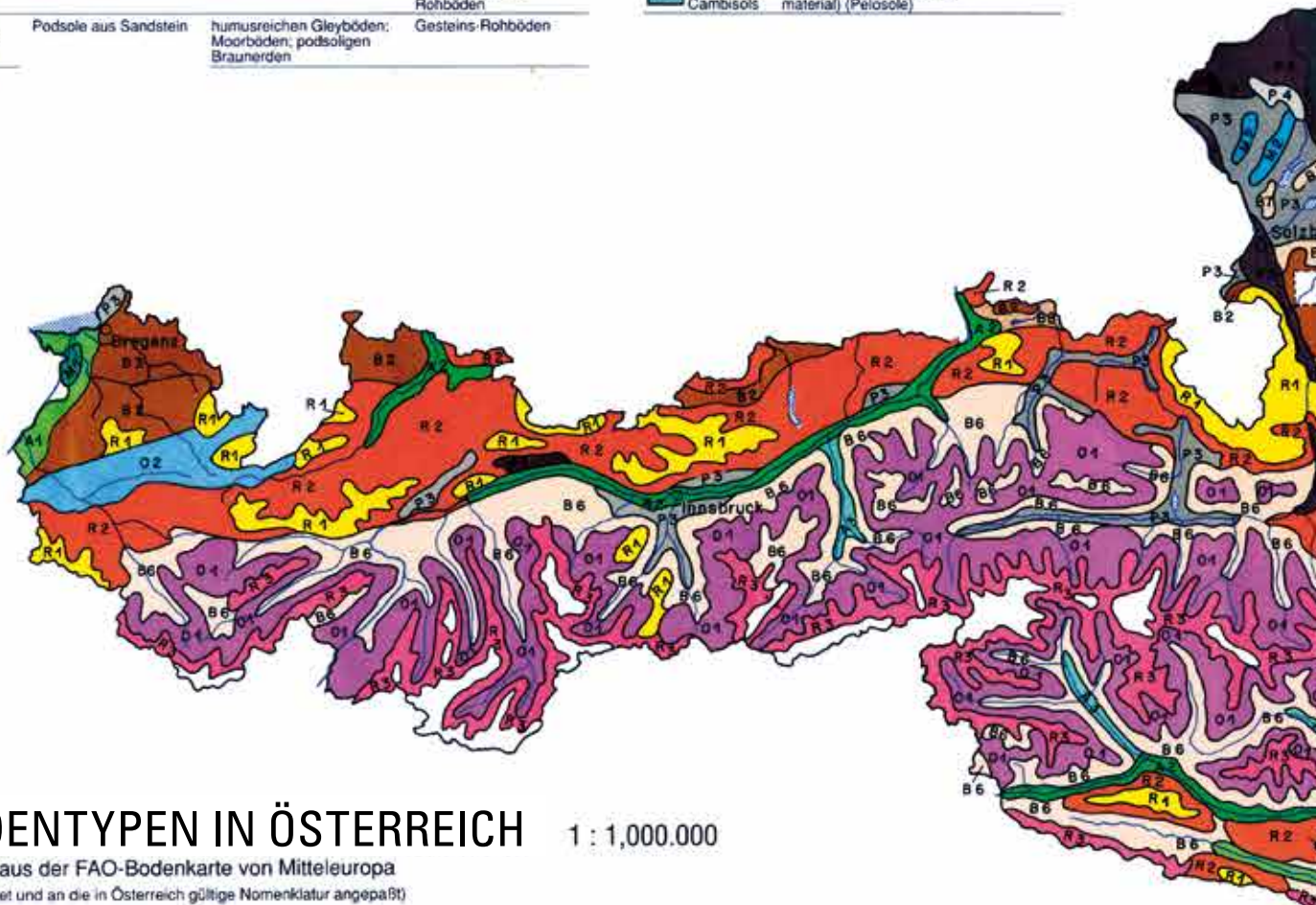
Bearbeitet von H. EGGER, H.G. KRENMAYR, G.W. MANDL, A. MATURA, A. NOWOTNY,
G. PASCHER †, G. PESTAL, J. PISTOTNIK, M. ROCKENSCHAUB und W. SCHNABEL.



Graphische Gestaltung und Ausführung:
M. BRÜGGEMANN-LEDOLTER,
ADV-Bearbeitung:
M. BRÜGGEMANN-LEDOLTER, J. RUTHNER.

FAO-Bez.	Österr. bodenkundl. Bez.	vergesellschaftet mit	miteingeschlossen
M1	Eutric Histosols (kalkhaltige) Moore (pH > 5,5)	kalkfreien Mooren (pH < 5,5)	Gleyböden
M2	Dystric Histosols	saure Moore und Anmoore	
A1	Eutric Fluvisols	vergleyten, kalkhaltigen Auböden; kalkhaltigen Gleyböden; Niedermooren	Moore und Anmoore; kalkhaltige Braunerden
A2	Calcic Fluvisols	vergleyten, kalkhaltigen Auböden	kalkhaltige Braunerden; kalkhaltige Gleye
A3	Dystric Fluvisols	kalkfreie Auböden	kalkfreie Gleye; saure Moore und Anmoore
R1	Calcic Lithosols	kalkhaltige Gesteins-Rohböden	anstehendem Fels
R2	Orthic Rendzinas	Eurendsinen einschließlich Pararendsinen	Gesteins-Rohböden u. z. T. humusreichen, kalkhaltigen Braunerden
R3	Dystric Lithosols	kalkfreie Gesteins-Rohböden	anstehendem Fels und kalkfr. Braunerden, auch kalkh. Gesteins-Rohböden
T1	Haplic Chernozems	Typische Tschernoseme	Degradierten Tschernosemen u. Paratschernosemen
T2	Luvic Chernozems	Degradierte Tschernoseme	kalkhaltigen Locker-sediment-Rohböden
T3	Haplic Phaeozems	feuchtere Tschernoseme (Feuchtschwarzerden)	stellenweise mit Salzböden
T4	Calcic Phaeozems	Tschernoseme	vergleyten Tschernosemen
O1	Leptic Podzols	Sempodsole	kalkfreien Braunerden
O2	(Gleyic) Podzols	Podsole aus Sandstein	humusreichen Gleyböden; Moorböden; podsoligen Braunerden

FAO-Bez.	Österr. bodenkundl. Bez.	vergesellschaftet mit	miteingeschlossen
B1	Eutric Cambisols	kalkhaltige Locker-sediment-Braunerden	kalkh. L-Rohböden; Braunkalkanreicherung; Braunrotlehme (vergl. Pararendzinas)
B2	Eutric Cambisols	kalkhaltige Braunerden	Rendsinen
B3	Eutric Cambisols	kalkhaltige Braunerden	kalkhaltigen Gleyen; Rendsinen
B4	Calcic Cambisols	Braunerden mit Kalkanreicherung	kalkhaltigen Auböden und Braunerden aus Alluvium
B5	Dystric Cambisols	kalkfreie Braunerden	Rankern
B6	Spodo-Dystric Cambisols	podsolige, kalkfreie Felsbraunerden	Podsolen; Rankern
B7	Dystric Cambisols	kalkfreie Braunerden	pseudovergleyten Braunerden
B8	Stagno-Gleyic Cambisols	pseudovergleyten Braunerden	kalkfreien u. kalkhaltigen Braunerden; Parabraunerden
	Orthic Luvisols	Parabraunerden meist aus Löß	Löß-Rohböden bzw. degradierten Tschernosemen
	Orthic Luvisols	Parabraunerden aus Kalkschottern	Lockersediment-Rohböden
P3	Orthic Luvisols	Parabraunerden	kalkhaltigen Braunerden aus tonigem Ausgangsmaterial
P4	Stagno-Gleyic Luvisols	pseudovergleyten Parabraunerden; Pseudogleye	Parabraunerden; kalkfreien und kalkhaltigen Braunerden
U	(Gleyic-) Vertic Cambisols	vergleyten Textur-Ortsböden (toniges Ausgangsmaterial) (Pelosole)	Gesteins-Rohböden; kalkhaltige Auböden; Humuspodsole



BODENTYPEN IN ÖSTERREICH 1 : 1,000,000

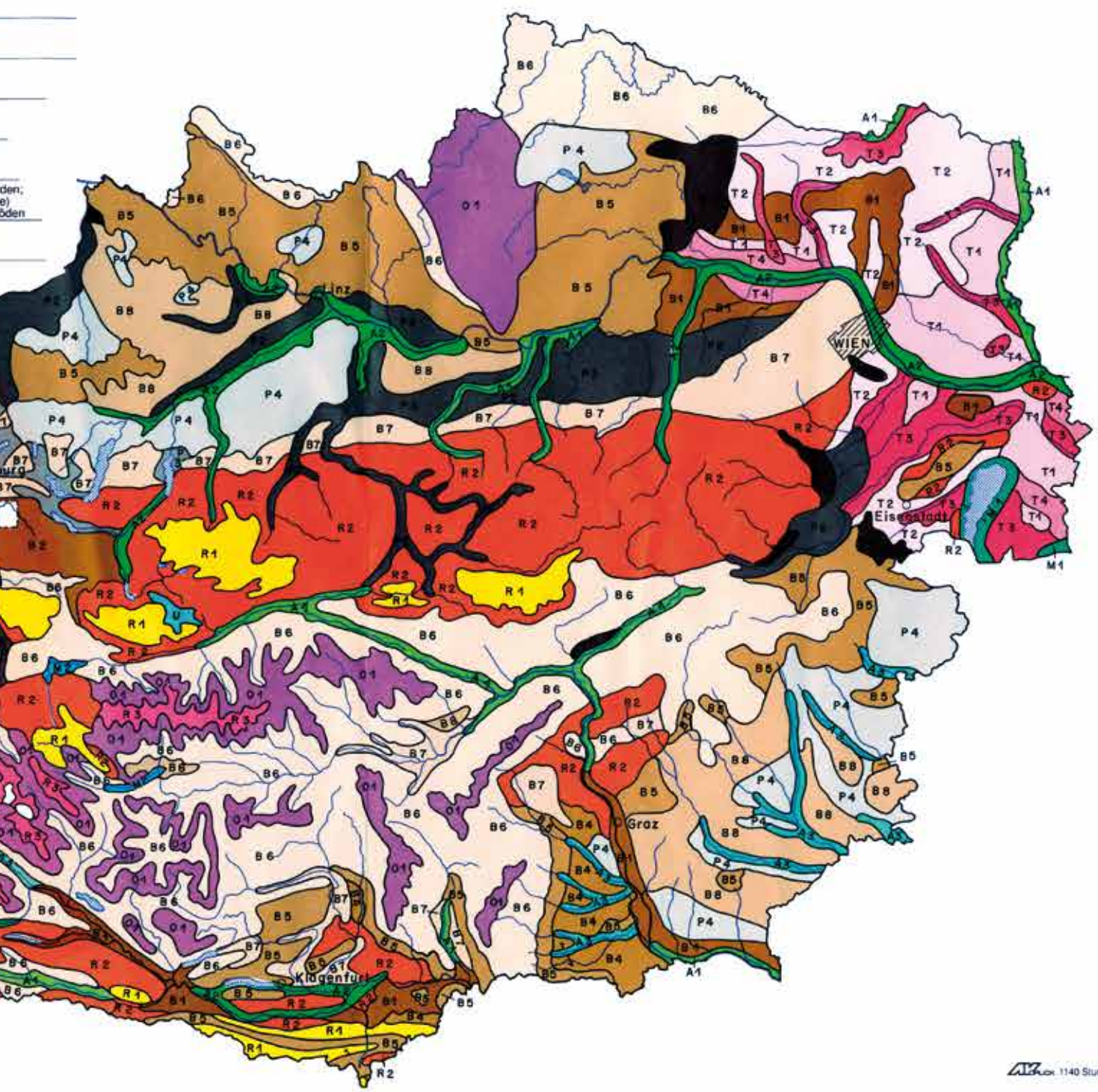
Auszug aus der FAO-Bodenkarte von Mitteleuropa
(überarbeitet und an die in Österreich gültige Nomenklatur angepaßt)

Überarbeitung und kartographische Ausführung:
Dr. Walter Rieck, Bundesanstalt für Bodenkunde



auerden m
unlehma;
braunerden)

Ausschnitt aus der scheinbar homogenen Bodenfläche
entsprechend der Detaildarstellung in der Bodenkarte 1 : 25.000

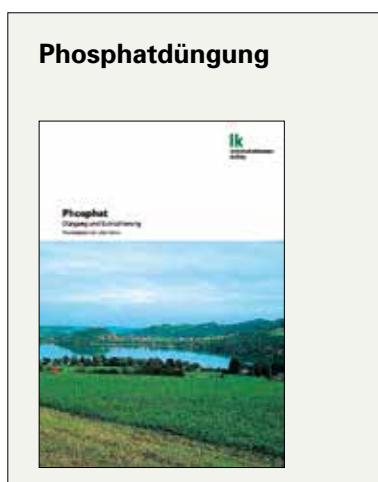
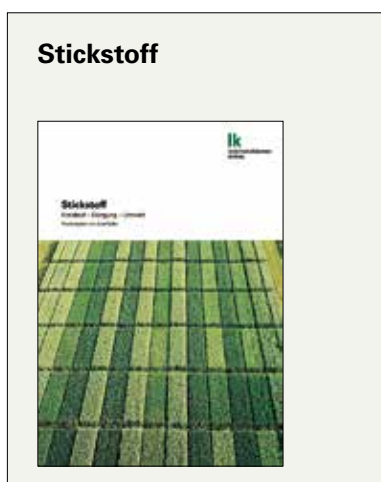


Sachregister

A		D		Kalkstroh-Liegematratze	86	Phosphatbindung	23, 24
Algenkalk	90	Dolomit	6	Kalkwert	58	Puffersysteme	27
Aluminium	16, 20, 23, 27, 29, 31, 39	Düngekalke	8, 52, 58	Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht	7	Pseudovergleyung	14
Anionenaustauschkapazität	31	Düngemittelgesetz	62	Kieselsäure	55	R	
Anionenauswaschung	35	E		Kohlensaurer Kalk, Calcit (Kalkspat)	6, 77	Reaktivitätszahl	60
Antagonismus	25	Erhaltungskalkung	67, 77	Konverterkalk	55	Reinkalk	
B		Erosion	49	Kopfkalkung	72	Regenwürmer	41
Basensättigung	29, 32	Eutrophierung	81	Kreidekalk	6, 53	Reinnährstoffpreis	61
Basenverluste	34	F		Krümelstabilitätstest	85	Rückstandskalke	52, 55
Big-Bag-Umschlag	64	Feldkapazität	15	Kalk-Zeigerpflanzen	76	S	
Bodenatmung	15, 36	Festlegungen	26	L		Schüttgewichte	62
Bodenarten	13	Feuchtkalk	54	Lebendverbauung		Schwefel, Silikate	55
Bodenansprache	82	Frostgare	46	Leguminosen	42	Seensanierung	
Bodenansprache	82	G		Lose-Siloumschlag		Schwarzkalk	56
Bodenatmung	35	Gefügestabilität	48	Löslichkeit von Kalcken	59	Spatenprobe	
Bodenfruchtbarkeit	11	Gesundungskalkung	67	Löschkalk	53	Stallhygiene	55
Bodenentstehung	10, 11	Gärsubstrate	50	M		Stoppelkalkung	69
Bodenbestandteile	13	Gips	6, 8, 88	Magmagesteine	11	Synergismus	25
Bodengefüge	13	Güllekalk	87	Magnesium	6, 29, 31, 32, 44, 52, 58, 60, 78	T	
Bodenleben	22, 40	Granulate	54	Mahlfeinheit	60	Teichwirtschaft	80
Bodenporen	14, 15	Graukalk	89	Meliorationskalk	68	Ton-Humus-Komplex	21, 45, 46
Bodenprofil	16	Grobporen	14, 15	Metamorphe Gesteine	11	Tonflockung	46, 85
Bodenschnelltest	83	H		Marmor	6	Totwasser	15
Bodenstruktur	45, 46, 48	Humusbildung	36, 39	Meereskalk	90	Ton-Schluff-Trennung	39, 49
Bodenversauerung	33, 35, 36, 38, 39	Hüttenkalk	56	Mergel	6, 9, 90	U	
Bodenversauerung durch Mineraldünger	37, 92	I		Mischkalk	53	Urgesteinsmehle	9
Bodentypen	11, 16, 17, 18, 100	Ionenaustausch	39	N		Umrechnungsfaktoren	61
Branntkalk	7, 29, 53, 71	Industriekalke	52	Naturkalke	52	V	
C		K		Nährstoffaufnahme	36	Vertriebsformen von Düngekalken	95
Calcium	8, 12	Kalk	6, 40	Nährstoffverfügbarkeit	22, 25	Verschlämmung	46, 49
Calcium-Blattdünger	43	Kalkabbau	7	O		Vorsaatkalkung	70
Calciummangel	43	Kalkauswaschung	34	Oxide (Branntkalke)	7, 29, 59	W	
Calciumcarbonat	6, 27	Kalkbedarf	67, 68, 73, 91	P		Walddüngung	78
Calciumhydrogencarbonat	7, 28	Kalk-Düngeprodukte	57	pH-Wert	19, 20, 21, 59	Wasserleitfähigkeit	48
Calciumhydroxid	28, 29	Kalkungszeiträume	66	pH-Werte in Böden	68, 73	Wirtschaftsdünger und Kalk	87
Calciumoxid	29	Kalk-Produktformen	54	pH-Ansprüche der Kulturpflanzen	22	Z	
Calciumsulfat	8, 88	Kationenaustauschkapazität	30	pH-Messung	83	Zelka	56
Carbonate	6, 7	Kationenerfüllung	31	Podsolierung	39, 74	Zitruskalk	56
Carbonat-Pufferung	27	Kalkhydrat	29	Porenvolumen	14	Zwischenfrüchte	50
Carbonatverwitterung	7, 27	Kalkmilch	29				
Carbokalk	55	Kalktest	84				
		Kalkstein	6				
		Kalksteinprodukte	8				

Weitere Broschüren

Herausgeber: Landwirtschaftskammer Salzburg, erstellt von: Dipl.-HLFL-Ing. Josef Galler
 Nachstehende Broschüren können bestellt werden: telefonisch: 0662/870571-247,
 per E-Mail: johanna.matzinger@lk-salzburg.at



Landwirtschaftskammer Salzburg

Ländlicher Raum

5024 Salzburg, Schwarzstraße 19

Tel. +43(0)662/870571-247

Fax +43(0)662/870571-295

beu@lk-salzburg.at

www.lk-salzburg.at