

Versauerung und Kalk-Düngung

- „Zuviel Kalk macht reiche Väter - arme Söhne“

- oder: „nachlässige Vornutzer,
arme Flächenübernehmer“

- Kationenaustausch

- pH Wert ↑ → Humusabbau:

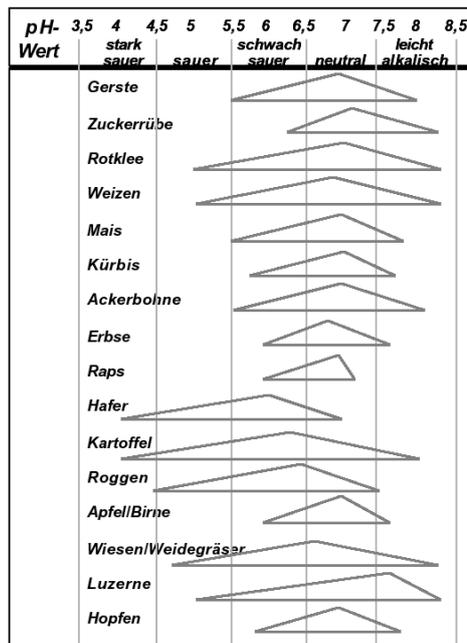
- Ca²⁺ macht die Nährstoffe für die Pflanze schnell verfügbar,
- erschöpft aber auch den Boden:
- hoher pH-Wert → Bodenleben ↑
- Aber: Edaphon ernährt sich von org. Material (Humus)
- Kurzfristig positiver Effekt: Freisetzung von Nährstoffen aus dem Humus
- Pflanzen ↑
- Sobald org. Material aufgezehrt ist, versiegt positiver Effekt
- Struktur des Bodens ↓



- Andererseits:

- Auch wer an der notwendigen Kalkung spart,
 - ..hinterlässt eine schlechte Bodenstruktur.

pH Optima der Kulturpflanzen



- Quelle:
Österreichische
Arbeitsgemeinschaft für
Grünland und Futterbau
Fachgruppe: Düngung
und Bestandesführung

Indikatorpflanzen

■ Säurezeiger

- Bürstling
- Heidekraut
- Heidelbeere
- Arnika
- Weiches Honiggras
- Drahtschmiele

■ Kalkzeiger

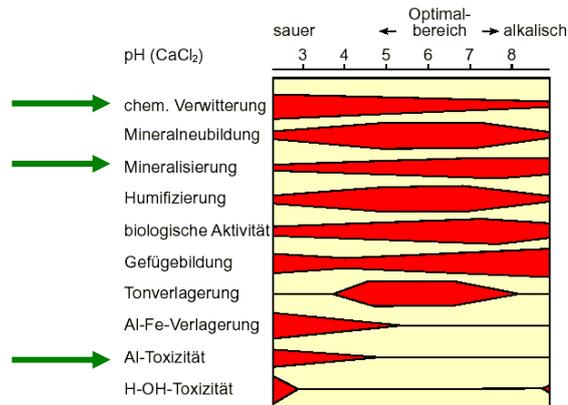
- Blaugras
- Erika
- Schneerose
- Hufeisenklee
- Aufrechte Trespe
- Wiesen-Salbei



Boden Acidität

- = Konzentration der H_3O^+ Ionen (Protonen H^+) in der Bodenlösung
- Bodenversauerung bei uns natürlicher Vorgang:
 - je älter, desto saurer.
 - Meist oben saurer als unten.
- Karbonatpufferung hält den Boden pH (annähernd) konstant:
 - **Protonen der Kohlensäure werden durch Kalk zum leicht basischen HCO_3^- Ion umgewandelt:**
 - (nach CO_2 Abdampfung bleibt OH^-)
 - $\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 \leftrightarrow \text{H}_2\text{CO}_3 \leftrightarrow \text{H}^+ + \text{HCO}_3^-$
 - $\text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 \leftrightarrow \text{Ca}^{2+} + 2 \text{HCO}_3^-$
- Weitere Puffersysteme:
 - Pufferung an variablen Ladungen:
 - Kationen funktioneller Gruppen werden gegen H^+ aus Bodenlösung getauscht.
 - Silikatpufferung:
 - Silikatverwitterung durch Säuren: langsam, irreversibel, **nur** bei tiefem pH!
 - Pufferung durch Oxidhydroxide:
 - **nur** bei tiefem pH, z.B. $\text{FeOOH} + 3\text{H}^+ \rightarrow 2\text{H}_2\text{O} + \text{Fe}^{3+}$

Beziehung: pH-Wert und ökologische Faktoren

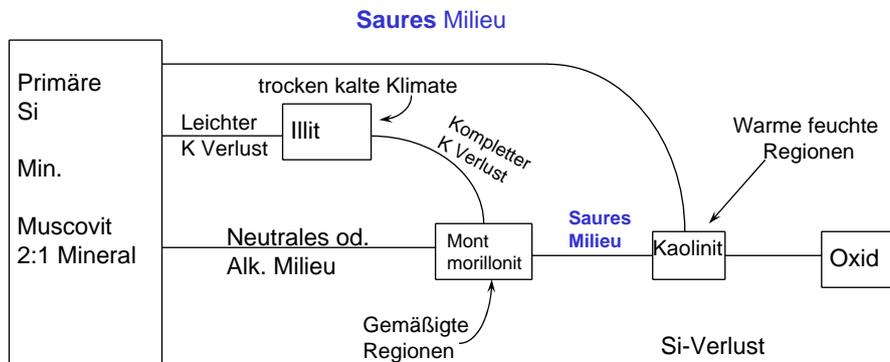


Einfluss auf Makro- u Mikronährstoffe kommt später detailliert

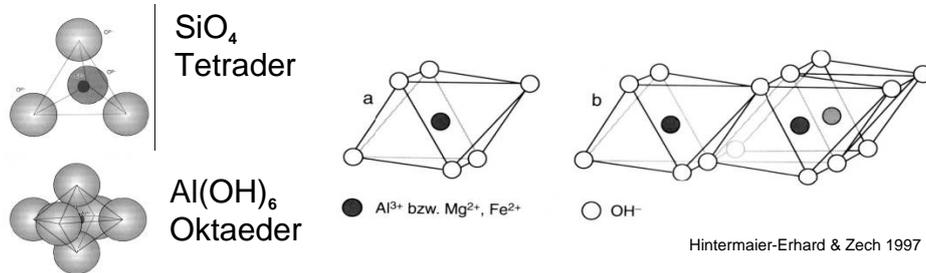
Bodenökologie, Gisi, 1997

Tonmineral-Abbau

Aus: Feldspäten - Mica - Amphibolen – Pyrexenen



Degradierung von Tonmineralen



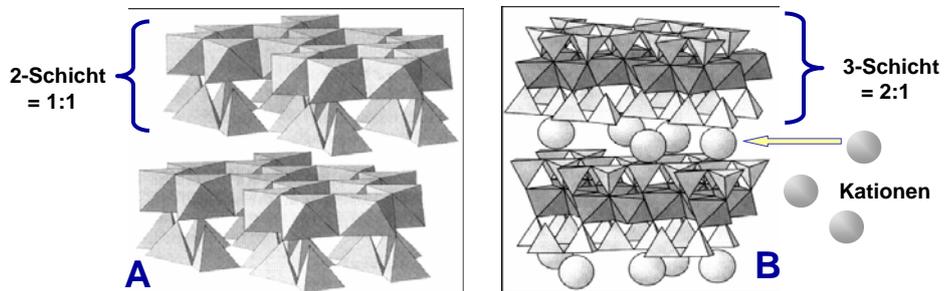
■ Isomorpher Ersatz:

- Austausch von Si^{4+}
 - durch Al^{3+} in Tetraedern

oder
 - Austausch von Al^{3+}
 - durch Mg^{2+} oder Fe^{2+} in Oktaedern
- permanente negative Ladung

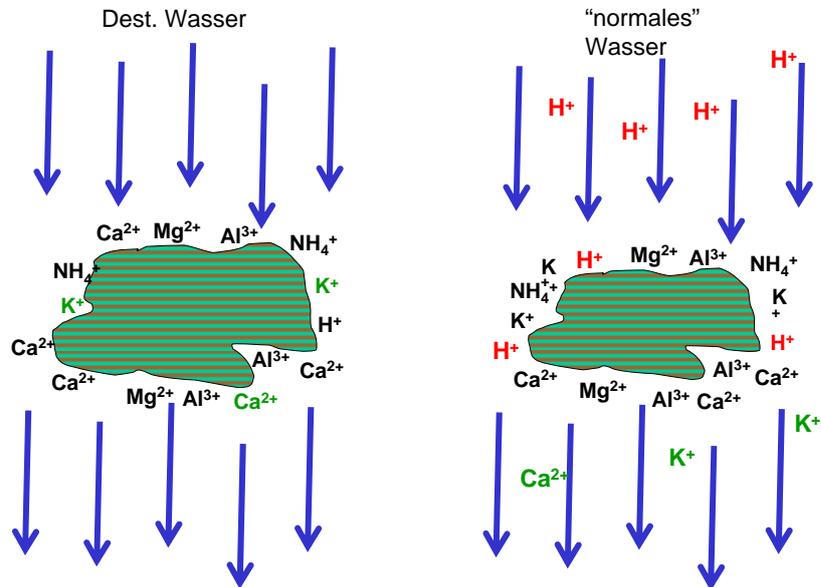
Tonminerale

- Zweischicht-Tonminerale (1:1): z.B. Kaolinit:
 - Schichtpakete (Abb. A, links) aus jeweils:
 - 1 Schicht $\text{AlO}_4(\text{OH})_2$ Oktaeder +
 - 1 Schicht SiO_4 -Tetraeder



- Dreischichttonminerale (2:1): Vermikulit, Smektit, Chlorit
 - (Abb. B, rechts): Schichtpakete aus je 2 Schichten $\text{AlO}_4(\text{OH})_2$ Oktaeder
 - und 1 Schicht SiO_4 -Tetraeder

Kationen-Austausch, Auswaschung



Versauernde Wirkung von Düngern

Düngemitteltyp	Nährstoffgehalt in kg/dt Ware				CaO ¹⁾
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	S	
Schwefelsaures Ammoniak (21) (Ammonsulfat)	21			24	-63
Piammon	33			12	-54
Ammonsulfatsalpeter (26) (Nitramon S)	26			14	-51
Urea S	38			7	-50
Harnstoff (46)	46				-46
NP (18+46) (DAP bzw. Diammonphosphat)	18	46			-37
Ammonium-Harnstoff-Lösung (28) (AHL)	28				-36
NPK (6+10+16) (DC start)	6	10	16	10	-30
NP (18+28) (NP-18:28 Agrolinz)	18	28		1	-23
NPK (20+8+8) (Vollkorn plus)	20	8	8	4	-22
PK (12+20) (DC 45 neu)		12	20	8	-20
Hyperphosphatkali (18+18) $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$		18	18		+22
Hyperphosphat (26) (gekörnt)		26			+30
Hyperphosphat (29) (fein)		29			+31
Kalkstickstoff (20) $\text{CaCN}_2 + \text{CaO}$	20				+35

¹⁾ äquivalente Kalkwirkung je dt. Handelsware, dh.: CaO-Negativwerte = Kalkzehrung
CaO-Positivwerte = Kalkmehrung

- Kalkzehrung vs. Kalkmehrung

weitere Prozesse der Bodenversauerung

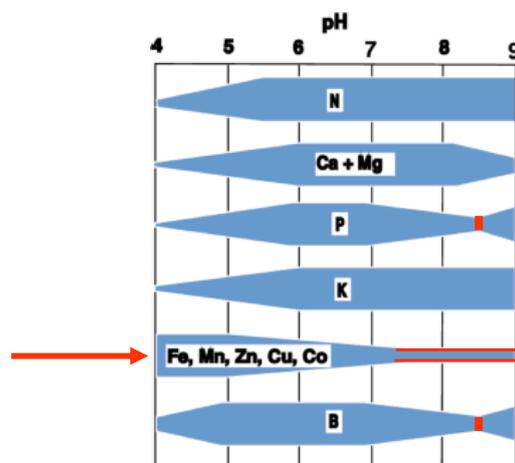
- **1. Bodenatmung**
 - $C_{org} + O_2 \rightarrow CO_2$ bis zu 12.000 kg CO_2 /ha-a
 - $CO_2 + H_2O \rightarrow H^+ + HCO_3^-$
- **2. Bildung organischer Säuren durch Pflanzen und Mikroorganismen**
 - $2 CH_2O + 1,5 O_2 \rightarrow HC_2O_4^-$ (Oxalat) + H^+ + H_2O
- **3. Aufnahme von kationischen Nährelementen (Kationen-Austausch)**
 - Mg^{2+} -Boden + 2 H^+ -Wurzel \rightarrow $2H^+$ -Boden + Mg^{2+} -Wurzel
- **4. Eintrag von SO_2 , NO_x , H_2SO_4 und HNO_3**
 - Schwefel-Immissionen: 25 - 100 kg S/ha-a \rightarrow erfordern 44 - 175 kg CaO/ha-a zur Neutralisation
 - pH des Niederschlagswassers:
 - Ländliche Gebiete: pH 4,5 - 4,1
 - Ballungsgebiete: pH 3,5
- **5. Oxidation von NH_4^+ und NH_3 aus Düngern und Einträgen aus der Atmosphäre**
 - $NH_4^+ + 2 O_2 \rightarrow NO_3^- + 2 H^+ + H_2O$
 - $NH_3 + 2 O_2 \rightarrow NO_3^- + H^+ + H_2O$
- **6. Oxidation biologisch gebundenen Stickstoffs**
 - $R-NH_2 + 2 O_2 \rightarrow R-OH + H^+ + NO_3^-$
- **7. Oxidation von Fe^{2+} , Mn^{2+} , Sulfiden und anderen reduzierenden Verbindungen**
 - $4 Fe^{2+} + O_2 + 6 H_2O \rightarrow 4 FeOOH + 8 H^+$
 - $4 FeS + 9 O_2 + 6 H_2O \rightarrow 4 FeOOH + 8 H^+ + 4 SO_4^{2-}$



} Nitrifikation

in gut durchlüfteten Böden

Verfügbarkeit der Nährstoffe in Abhängigkeit vom pH-Wert



Boden-pH-Wert

Verfügbarkeit und pH Wert

- **Eisen: Fe-Oxide**
 - Löslichkeit abh. von pH und Redoxpotential.
 - Fe-Mangel: Nur auf Böden, die reich sind an organischer Subst. oder Carbonaten
- **Mangan: Mn^{2+} , Mn^{3+} , Mn^{4+}**
 - Löslichkeit: Abh. von pH und Redoxpotential
 - Pflanzenverfügbar: gelöstes und adsorbiertes Mn^{2+}
 - Mn Mangel: in kalkhaltigen Niedermooren
 - Mn-Toxizität: oft auf sauren Böden mit niedrigem Eh
- **Molybdän (Mo) Pflanzenaufnehmbar: $HMoO_4^-$, $HMoO_4^{2-}$**
 - können durch Liganden-Austausch an Fe-Oxide gebunden sein (bei saurem pH)
 - Wegen der pH-Abhängigkeit dieser Bindung sind **versauerte Böden am ehesten an Mo verarmt.**
- **Bor (B): Bodenlösung enthält Bor v.a. als schwache Borsäure $B(OH)_3$**
 - organische B-Komplexe bilden wichtige B-Reserve.
 - Vor allem tonarme und podsolierte Böden benötigen regelmäßige B Düngung.
- **Zink (Zn)**
 - Zn-Ionen: relativ fest an Oxide gebunden.
 - Gehalte in der Bodenlösung steigen mit Verringerung des pH.
 - Zn-Mangel kann vor allem in alkalischen Böden auftreten; auch toxische Wirkungen möglich.
- **Kupfer (Cu)**
 - kommt in verschiedenen Mineralen, z.T. als isomorpher Ersatz vor.
 - Mangel auf Böden mit viel Org. Subst. (Heidemoorkrankheit), Toxizität möglich (bei saurem pH)

Kalk: Verlust- 'sinks'

Auswaschung von Kalk aus "freiem, fein verteilten kohlensaurem Kalk" (Calcit, $CaCO_3$)

- in gelöster Form
- in Partikelform
- **Auswaschung von Calcium-Ionen, Calciumsalze**
 - $CaSO_4$
 - $Ca(NO_3)_2$
 - $CaCl_2$
- **Neutralisationsbedarf von**
 - physiologisch sauren Düngemitteln (vorwiegend N-Düngern)
 - SO_2 - und NO_x -Immissionen (Industrie, Kraftwerke, Hausbrand, Verkehr)
 - Org. u mineral. Säuren aus:
 - gärender org. Substanz (z.B. Rübenblätter, Grunddüngung),
 - Kohlensäure (Atmung von Mikroorganismen)

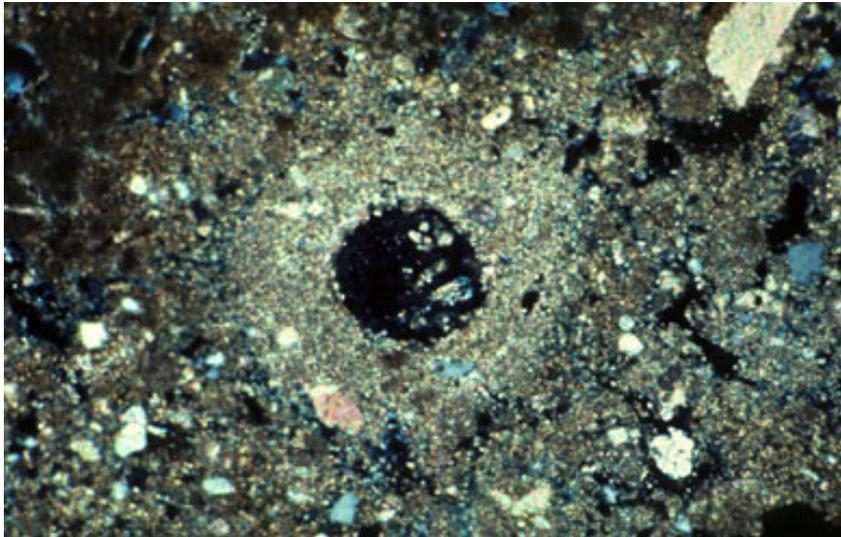
Wirkungsweisen des Kalkes

- **Chemische Wirkung:**
 - pH-Wert ~ Kalkversorgungszustand ~ Verfügbarkeit der Nährstoffe.
Optimum: P und B: pH 6 – 7
 - Metalle: **Opt. pH: Saurer** Bereich, außer Mo
- **Physikalische Wirkung:**
 - Kalk-Brücken zwischen Tonteilchen
 - Stabile Bodenkrümel
 - Strukturverbessernde Wirkung !
 - Verschlammungs- und Erosionsneigung ↓
 - Böden sind tragfähiger und weniger anfällig gegenüber Verdichtungen,
 - → Wurzelwachstum
 - Luft-, Wasser- und Wärmehaushalt des Bodens → Bodengare
- **Biologische Wirkung:**
 - Optimaler pH-Wert für Bodenlebewesen
 - Erhöhung der biologischen Aktivität
 - Gefügebildung (Regenwürmer)
 - schnellerer Umsatz der organischen Reste
 - Verbesserung der Humusform (Rohhumus, Moder, Mull)

Eingeschränkte Mobilität

- **TON-FLOCKUNG im BODEN:**
 - Anlagerung von positiv geladenen Kalzium- und Magnesium-Ionen an die negativ geladenen Tonteilchen, aber auch Huminsäuren
 - → Brücke zwischen Ton und Humus.
 - → stabile Bodenkrümel
 - → Netz an Grob- und Feinporen
- **TON-FLOCKUNG in der PFLANZE:**
 - In den Assimilat-Leitbahnen des Phloems (Siebröhren) bildet Calcium schwerlösliche Phosphate
 - → wird somit immobil in basipetaler Richtung (STRASBURGER et al. 1983).

Ca- Überversorgung



- Bei Calcium-Überversorgung der Pflanze (via Massenfluss) → Exkretion aus der Wurzel →
- Anreicherung im Boden rund um einen alten Wurzelkanal (Foto: G.Callot)
- → was bedeutet Ca-Anreicherung für die P-Versorgung ?

Kalkdünger

Silo:
22 Tonnen



Form	Gehalt	= basische Wirkg.
Kohlensaurer Kalk, Kalkmergel mit 15 – 40 % MgCO ₃	80 % CaCO ₃ 90 % CaCO ₃	= 45 % CaO = 50 % CaO
Löschkalk mit 15 – 30 % MgO	80 % Ca(OH) ₂ 90 % Ca(OH) ₂	= 60 % CaO = 68 % CaO
Brantkalk mit 15 – 40 % MgO		= 70 % CaO = 90 % CaO
Hüttenkalk mit Mg und Spurenelementen	(Ca ₂ SiO ₄)	= 90 % CaO

Kohlensaurer Kalk

- reiner Kalkstein wird vermahlen.

Kalkdünger	Basische Wirkung CaO- und MgO-Gehalt	tatsächliche Kalkform, Wirkung und Nebenbestandteile
Kohlensaurer Kalk	45 - 53 % davon bis 7 % MgO	80 - 95 % CaCO ₃ und MgCO ₃ langsam und nachhaltig
Kohlensaurer-Magnesiumkalk	45 - 53 % davon 7 - 20 % MgO	
Brantkalk	80 - 95 %	gebrannter Kalk mit sehr schneller Wirkung
Mischkalk	60 - 65 %	Gemisch aus Brantkalk und kohlen-saurem Kalk; schnelle aber weniger nachhaltige Wirkung
Hüttenkalk	47 % davon 7 % MgO	kieselsaure Kalke mit nachhaltiger Wirkung Spurennährstoffe Thomaskalk 4 mit 4 % P ₂ O ₅
Konverterkalk (feucht-körnig)	43 % davon 5 % MgO	
Thomaskalk	45 - 46 % davon 2-3 % MgO	
Carbokalk	28 - 30 % davon 1 % MgO	Abfallkalk der Zuckerfabriken mit schneller Wirkung N, P und organische Stoffe
Rückstandskalke z. B. aus Kraftwerken	mindestens 30 %	überwiegend als CaCO ₃

Ca Entzug durch Kulturpflanzen

Ernte

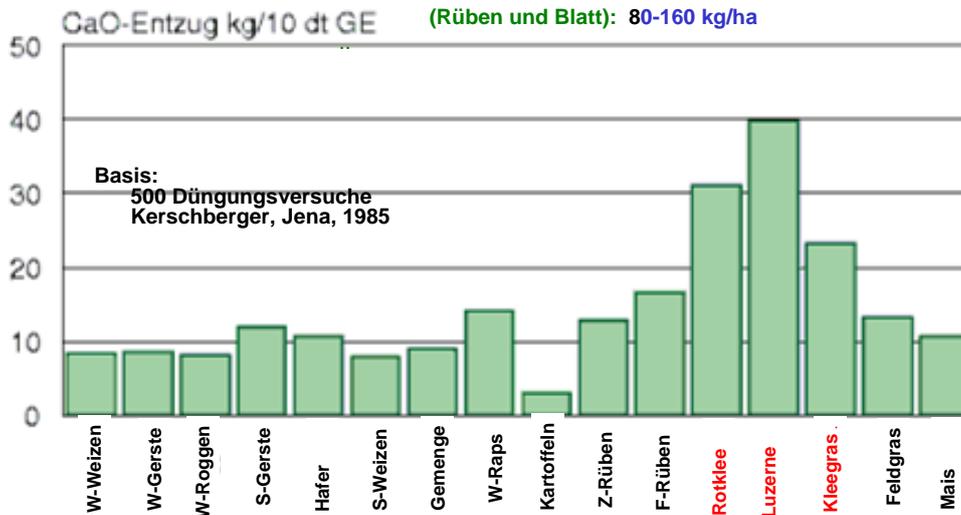
Entzug CaO

50 dt Getreide nur Korn:
mit Stroh:

2-8 kg/ha
30-50 kg/ha

500 dt Zuckerrüben

(Rüben und Blatt): 80-160 kg/ha



Unvermeidbarer Kalkbedarf

durch Auswaschung und Neutralisation in Abhängigkeit von

- 1. Bodennutzung
- 2. Bodenart
- 3. Niederschlag

in kg/ha*a CaO:

Bodenart (Abk.)	Nutzungs- form	Niederschläge		
		Niedrig (<600 mm)	Mittel (600-750 mm)	Hoch (>750 mm)
Leicht (S, IS)	Acker	300	400	500
	Grünland	150	250	350
Mittel (sL bis tL)	Acker	400	500	600
	Grünland	200	300	400
Schwer (tL, T)	Acker	500	600	700
	Grünland	300	350	450

Gesundungs- u. Erhaltungskalkung

abhängig v. Bodenart und die Bodenschwere

pH-Wert		3,8	4,2	5	6,2	6,5		
Puffersysteme		starke Säuren Oxide von Fe, Al, Austauscher			Silicate	H ₂ CO ₃	CaCO ₃	
ackerbaulich relevante pH-Bereiche		<5,0			5,0 - 6,5	>6,5		
KalkbedarfsEinstufung je nach Bodenart	humose Sandböden	Gesundungskalkung			kein Kalkbedarf			
	andere Sandböden							
	lehmige Sandböden						Erhaltungskalkung	
	sandige und schluffige Sandböden						Erhaltungskalkung	
	tonige Lehm- böden und Tonböden						Erhaltungskalkung	

■ tonreiche Böden:
größeres
Puffervermögen

- → können Ca⁺⁺ besser einbauen
- → pH-Wert steigt langsamer
- Test auf Calcium-carbonat-Gehalt:
- sog. Carbonatattest = 10% HCl

Wörterbuch der
Bodenkunde,
Hintermeier-
Erhard, 1997

Ca Ernährung ≠ Kalkung

1. pH Wert Messungen

- direkt oder
- in Acetat (→ potentielle Acidität, enge Spanne → H-Wert:)
 $H = 5703,8 - 2575,8 \times \text{pH}_{\text{AC}} + 388,7 \times (\text{pH}_{\text{AC}})^2 - 19,59 \times (\text{pH}_{\text{AC}})^3$
- in CaCl_2 (ÖNORM L1083)



- 2. → H Wert = Anteil des H^+ an der KAK = mval H^+

Allg. Ableitung:

- Wenn H-Wert = 1 →
- 1 mval H^+ / 100g Boden = 1 mval CaO / 100g Boden

- Dies entspricht der CaO Menge : (Valenzen zählen)
- = 56 / 2 = 28 mg CaO / 100g
- → bei 1 ha 20cm Bodenschicht: = 8,4 dt CaO / 3.000.000 kg
= Kalkbedarf für Ziel: pH 7

- 3. → Kalkbedarf für andere H-Werte und andere pH-Ziele

→ Tabelle oder Rechnung

Oben errechneter Faktor 8,4 dient der Umrechnung auf Hektar und 20 cm Krumentiefe (vgl. SCHALLER 1993).



Bestimmung des Kalkbedarfs

- Bestimmung des Kalkbedarfs von Oberböden (20cm) nach SCHACHTSCHABEL

potentielle Acidität Acetat-pH	H-Wert mval/100g	Kalkung mit dt/ha CaO bei				
		pH-Ziel 7 8,4 CaO dt/ha	pH-Ziel = 6,5	pH-Ziel = 6,0	pH-Ziel = 5,5	pH-Ziel = 5,0
		pH des Bodens	pH des Bodens	pH des Bodens	pH des Bodens	pH des Bodens
6,9	0,7	6	6,2	6,0	5,7	5,2
6,8	1,4	12	2 4 4 4 5	5,7-5,5	5,5	5,0
6,7	2,0	17	6 9 11 12 13	5,4-5,0	5,3	4,6
6,6	2,7	23	9 12 15 17 18	<5,0	4,9-4,6	4,4
6,5	3,5	29	11 15 19 21 23		<4,6	<4,1
6,4	4,3	36	14 18 23 26 28			4,7
6,3	5,4	45	17 23 29 32 35			4,5
6,2	6,5	55	21 28 35 40 43			4,2-4,1
6,1	8,3	70	26 35 45 51 55			3,7-3,5
6,0	11,0	90	34 45 58 65 70			<1,5
5,9	14,0	120	45 60 77 87 94			
5,8	23	190	71 95 122 137 149			

- Bei mächtigeren Böden: z.B. 30 cm → Mengenaufschlag für CaO : + 50%

Lit:
 FAUSER, O.: Kulturtechnische Bodenverbesserungen. I, Allgemeines, Entwässerung. Sammlung Göschen, Bd. 691. Berlin 1959.
 FINCK, A.: Dünger und Düngung. Grundlagen und Anleitung zur Düngung von Kulturpflanzen. Weinheim 21992.
 SCHALLER, K.: Praktikum zur Bodenkunde und Pflanzenernährung. Geisenheim 71993.
 SCHEFFER, F./SCHACHTSCHABEL, P.: Lehrbuch der Bodenkunde. Stuttgart 131992.
 SCHLICHTING, E./BLUME, H.P./STAHR, K.: Bodenkundliches Praktikum. Berlin (u.a.) 21995.

Errechnung des Kalkbedarfs

- Die direkte Berechnung ist auch über folgende Formel möglich:
- Kalkbedarf für $\text{pH}_{\text{Ziel}} = \frac{(\text{pH}_{\text{Ziel}} - \text{pH})}{(7 - \text{pH})} \cdot (1 \cdot 8,4)$ (=dt CaO für pH 7)
- Beispiel:
 - pH-Ziel: **6,0**
 - pH-Wert: **5,3** (gemessen)
 - $\text{pH}_{\text{Acetat}}$: **6,5** → siehe Tabelle → entspricht **H-Wert von 3,5**
 - → Ablesen des Kalkbedarfs für pH-Ziel **6,0** und **pH-Wert**

Kalk-Bedarf-Berechnung.xls

Bestimmung des Kalkbedarfs

- Bestimmung des Kalkbedarfs von Oberböden (20 cm) nach SCHACHTSCHABEL

potenzielle Acidität Acetat-pH	H-Wert mval/100g	Kalkung mit dt/ha CaO bei																								
		pH-Ziel 7					pH-Ziel = 6,5					pH-Ziel = 6,0					pH-Ziel = 5,5					pH-Ziel = 5,0				
		pH des Bodens					pH des Bodens					pH des Bodens					pH des Bodens					pH des Bodens				
6,9	0,7	6	6,2	6,0	5,7-5,6	5,4-5,0	<5,0	5,7	5,5	5,3	4,9-4,6	<4,6	5,2	5,0	4,6	4,4	<4,1	4,7	4,5	4,2-4,1	3,7-3,5	<1,5				
6,8	1,4	12	2	4	4	4	5	1	2	2	3	4	1	2	2	3	3	1	1	2	2	3				
6,7	2,0	17	5	6	8	9	9	3	4	5	7	8	2	3	5	5	6	2	2	4	5	6				
6,6	2,7	23	6	9	11	12	13	4	6	7	10	11	3	4	6	7	9	2	3	5	7	8				
6,5	3,5	29	9	12	15	17	18	5	8	9	13	14	4	6	9	10	12	3	5	7	9	11				
6,4	4,3	36	11	15	19	21	23	7	10	12	16	18	5	7	11	12	15	4	6	9	12	14				
6,3	5,4	45	14	18	23	26	28	8	12	15	20	23	6	9	14	15	18	5	7	11	15	17				
6,2	6,5	55	17	23	29	32	35	10	15	19	25	28	8	11	17	19	23	6	9	13	19	21				
6,1	8,3	70	21	28	35	40	43	13	18	22	31	35	9	14	21	23	28	7	11	16	23	26				
6,0	11,0	90	26	35	45	51	55	16	23	29	40	44	12	18	26	30	35	9	14	21	29	33				
5,9	14,0	120	34	45	58	65	70	21	30	37	51	57	15	23	34	38	45	12	18	27	37	43				
5,8	23	190	45	60	77	87	94	27	39	49	67	74	20	30	44	50	59	15	24	35	49	56				
			71	95	122	137	149	44	63	78	107	120	32	48	71	81	95	25	38	57	78	90				

- Kalkbedarf Pro Hektar und 20 cm Krumentiefe (vgl. SCHALLER 1993).

Lit:
 FAUSER, O.: Kulturtechnische Bodenverbesserungen. I, Allgemeines, Entwässerung. Sammlung Göschen, Bd. 691. Berlin 1959.
 FINCK, A.: Dünger und Düngung. Grundlagen und Anleitung zur Düngung von Kulturpflanzen. Weinheim
 SCHALLER, K.: Praktikum zur Bodenkunde und Pflanzenernährung. Geisenheim
 SCHEFFER, F./SCHACHTSCHABEL, P.: Lehrbuch der Bodenkunde. Stuttgart
 SCHLICHTING, E./BLUME, H.P./STAHR, K.: Bodenkundliches Praktikum. Berlin (u.a.)

Errechnung des Kalkbedarfs

- Die direkte Berechnung ist auch über folgende Formel möglich:
- Kalkbedarf für $\text{pH}_{\text{Ziel}} = \frac{\text{pH}_{\text{Ziel}} - \text{pH}}{7 - \text{pH}} * (1 * 8,4)$ (=dt CaO für pH 7)
- Beispiel:
- pH-Ziel: **6,0**
- pH-Wert: **5,3**
- $\text{pH}_{\text{Acetat}}$: **6,5** → siehe Tabelle → entspricht **H-Wert von 3,5**
- Kalkbedarf für $\text{pH}_{7\text{wäre}} = \frac{(7 - 5,3)}{(7 - 5,3)} * 3,5 * 8,4 = 29 \text{ dt/ha CaO}$ (für pH 7)
- Kalkbedarf für $\text{pH}_{\text{Ziel}} = \frac{(6 - 5,3)}{(7 - 5,3)} * 3,5 * 8,4 = \underline{12 \text{ dt/ha CaO}}$ (für pH 6)

Ziel-pH-Wert und Erhaltungskalkung für Ackerland

- Einbeziehung des Humusgehaltes:**
Humose Böden haben geringeren Kalkbedarf
- Zu hohe Kalk-Gaben führen zu Humus-Abbau
- Die Kalkempfehlung für Moorstandorte bezieht sich auf Hochmoor,
Niedermoorstandorte weisen meist von Natur aus pH-Werte von 6- 6,5 auf und bedürfen keiner Kalkung.

Bodenart:	Ziel-pH-Wert und Erhaltungskalkung* (kg/ha CaO) in Abhängigkeit vom Humusgehalt					maximale Kalkgabe pro Jahr in kg/ha CaO
	bis 4 % humusarm bis humos	4,1-8 % stark humos	8,1-15 % sehr stark humos	15,1-30 % anmoorig	über 30 % Moor**	
S	<u>5,6</u> 600	5,2 500	<u>4,8</u> 400	4,3 200	4,1 0	1000
IS, sU	6,0 900	5,6 800	5,2 700	4,8 300		1500
ssL, IU	6,4 1100	6,0 900	5,6 700	5,1 400		2000
sL, uL, L	6,8 1300	6,3 1100	5,8 900	5,2 500		3000
utL, tL, T	7,0 1600	6,5 1500	6,0 1200	5,4 600		4000

- Die empfohlenen Kalkmengen beziehen sich auf eine dreijährige Fruchtfolge mit mittlerem Ertragsniveau bei 850 mm Jahresniederschlag.

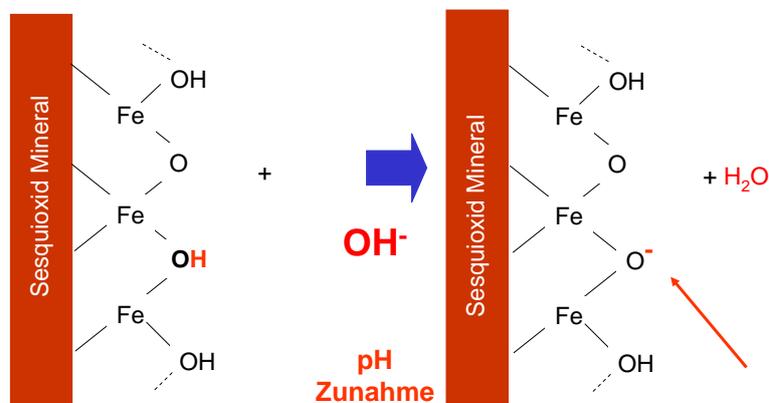
AufkalkungsEmpfehlung für Ackerland

pH-Wert	Aufkalkungsempfehlung für Ackerland (kg/ha CaO) bei 2 % Humus in Abhängigkeit von Ist-pH-Wert und Bodenart				
	S	IS, sU	ssL, IU	sL, uL, L	utL, tL, T
5,0	2049	3798	6385	7847	9429
5,1	1807	3508	6007	7482	9037
5,2	1565	3218	5630	7118	8646
5,3	1322	2929	5252	6753	8255
5,4	1080	2639	4875	6388	7864
5,5	838	2349	4497	6024	7473
5,6	Erhaltungskalkung	2060	4120	5659	7082
5,7		1770	3742	5294	6691
5,8		1480	3365	4930	6300
5,9		1191	2988	4565	5909
6,0		Erhaltungskalkung	2610	4200	5518
6,1			2233	3836	5127
6,2			1855	3471	4736
6,3			1478	3106	4345
6,4			Erhaltungskalkung	2742	3954
6,5				2377	3563
6,6				2012	3172
6,7				1648	2781
6,8				Erhaltungskalkung	2390
6,9					1999
7,0					Erhaltungskalkung

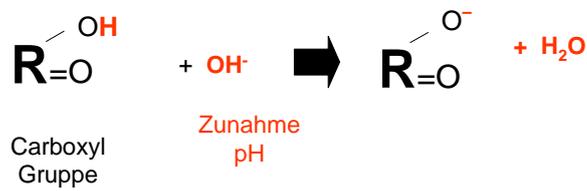
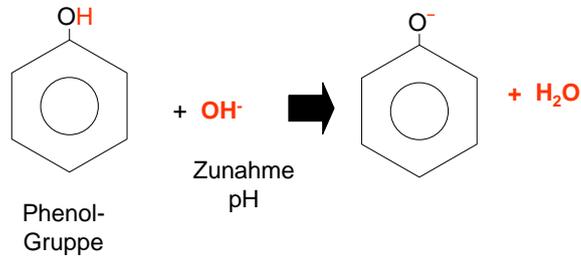
- Empfehlung in kg Kalk / ha.
- Die Gaben müssen u.U. geteilt werden, (siehe Tabelle mit Ziel-pH-Wert, vorher)

Effekt: pH abhängige Ladung an Oxiden

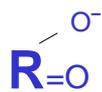
- $\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca}^{++} + \dots ?$
- Nährstoffe binden an den Oberflächen von Mineralen
 - (Sesqui-)Oxiden



pH abhängige Ladung an org. Verbindungen



pH abhängige Ladung org. Masse



Humus: Huminsäuren und Fulvosäuren:

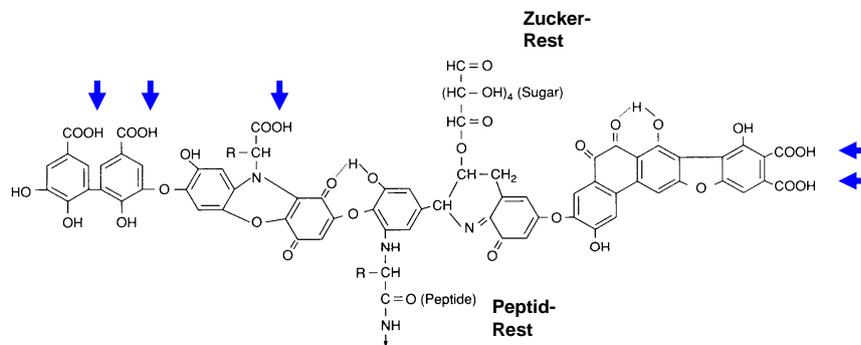
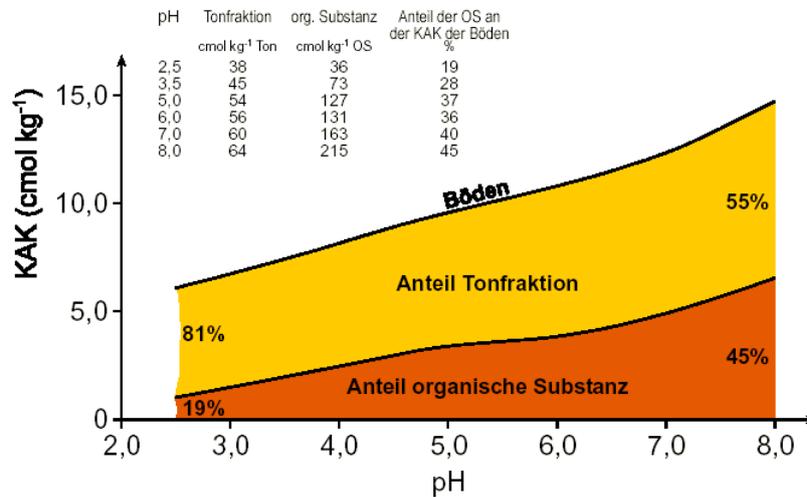


FIGURE 2.8 Suggested structure for humic acid in soil. The COOH and OH groups are the pH-dependent sites. *Mortvedt, Giordano, and Lindsay (Eds.), Micronutrients in Agriculture, ASA, 1972.*

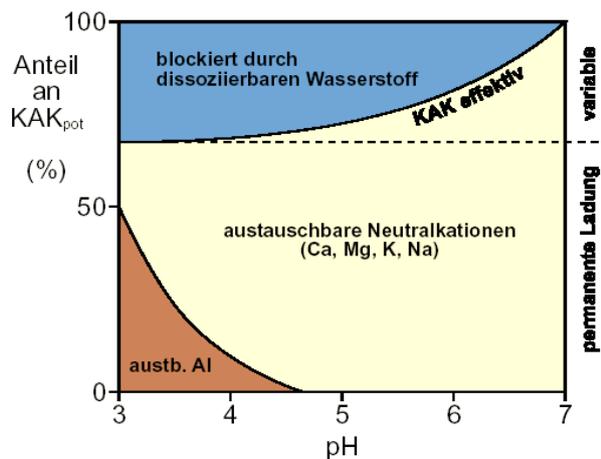
Anteil der Org. Substanz (OS) an der Austauschkapazität



Anteil von Tonfraktion und organischer Substanz an der Gesamtaustauschkapazität von Böden in Abhängigkeit vom pH-Wert; Mittelwert der Ap-Horizonte von 60 Böden
nach Helling 1964, aus Sparks 1995

Kationenbelag in Tonmineralen

- Abhängigkeit der **effektiven KAK** vom pH-Wert in einem Boden mit 20-30% Tonanteil und 2-3% Humus.



Scheffer /
Schachtschabel 1998

- Die **potentielle KAK** enthält zusätzlich zu den basischen Kationen die dissoziierbaren Protonen (blau hinterlegt).