

Bodenkultur und Düngung – Calcium, Magnesium, Schwefel

AT3 - Wintersemester 2025/26

Prof. Dr. Carl-Philipp Federolf

03.12.2025

Calcium im Boden

- Calcium kommt im Boden in natürlicher Form vorwiegend als CaCO_3 (Calcit in Kalksteinen vor)
- CaCO_3 ist in Wasser kaum löslich; erst in Verbindung mit Kohlensäure stärker löslich:
 - $\text{CaCO}_3 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca}(\text{HCO}_3)_2 \rightarrow \text{Ca}^{2+} + 2\text{OH}^- + 2\text{CO}_2$
 - im Boden sehr mobil und damit leicht auswaschbar!
 - aber auch in Ionen-Form wird Ca aufgrund der hohen Konzentrationen in der Bodenlösung in großen Mengen ausgewaschen
 - Ca wird von allen Nährelementen am stärksten ausgewaschen (100 – 600 kg Ca/ha*a)
 - Entzug über die Ernte dagegen eher gering

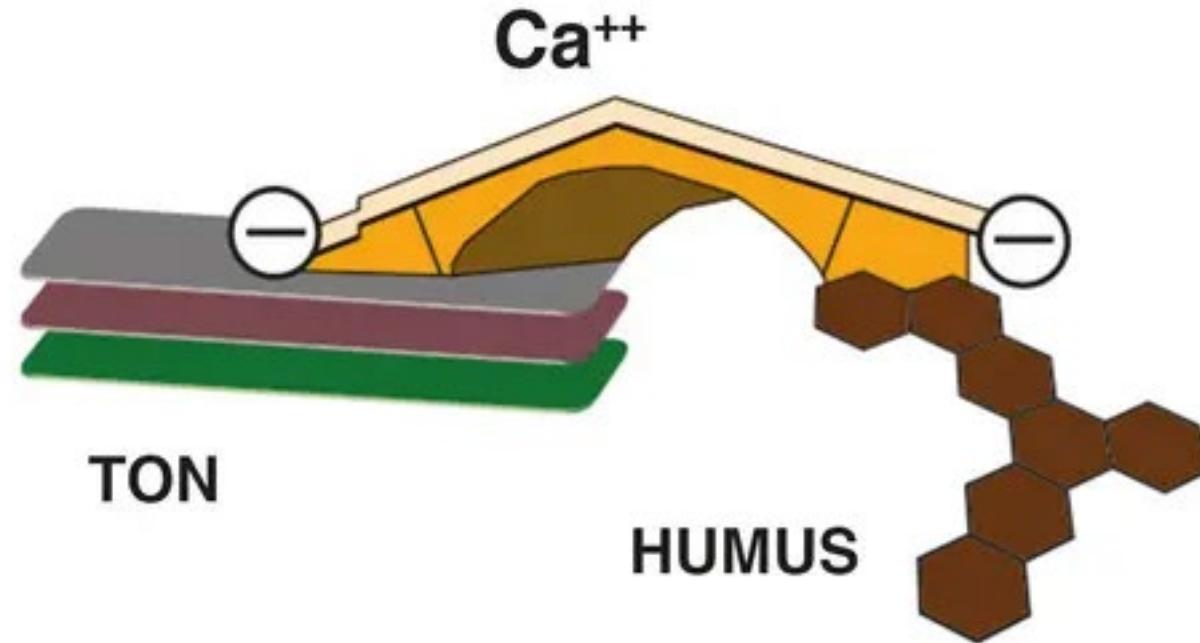
Calcium in der Pflanze

- Integraler Bestandteil der Zellwände und Membranen
- wichtiges Gegenion zum Ladungsausgleich
- aktiviert zahlreiche Enzyme
- Zentraler Baustein des zellulären Signalnetzwerkes
 - Kälte- und Stresstoleranz
 - Wurzel- und Wurzelhaarwachstum
 - Krankheitsresistenz
 - Etablierung von Wurzelsymbiosen

Ziele der Ca- Düngung (Kalkung)

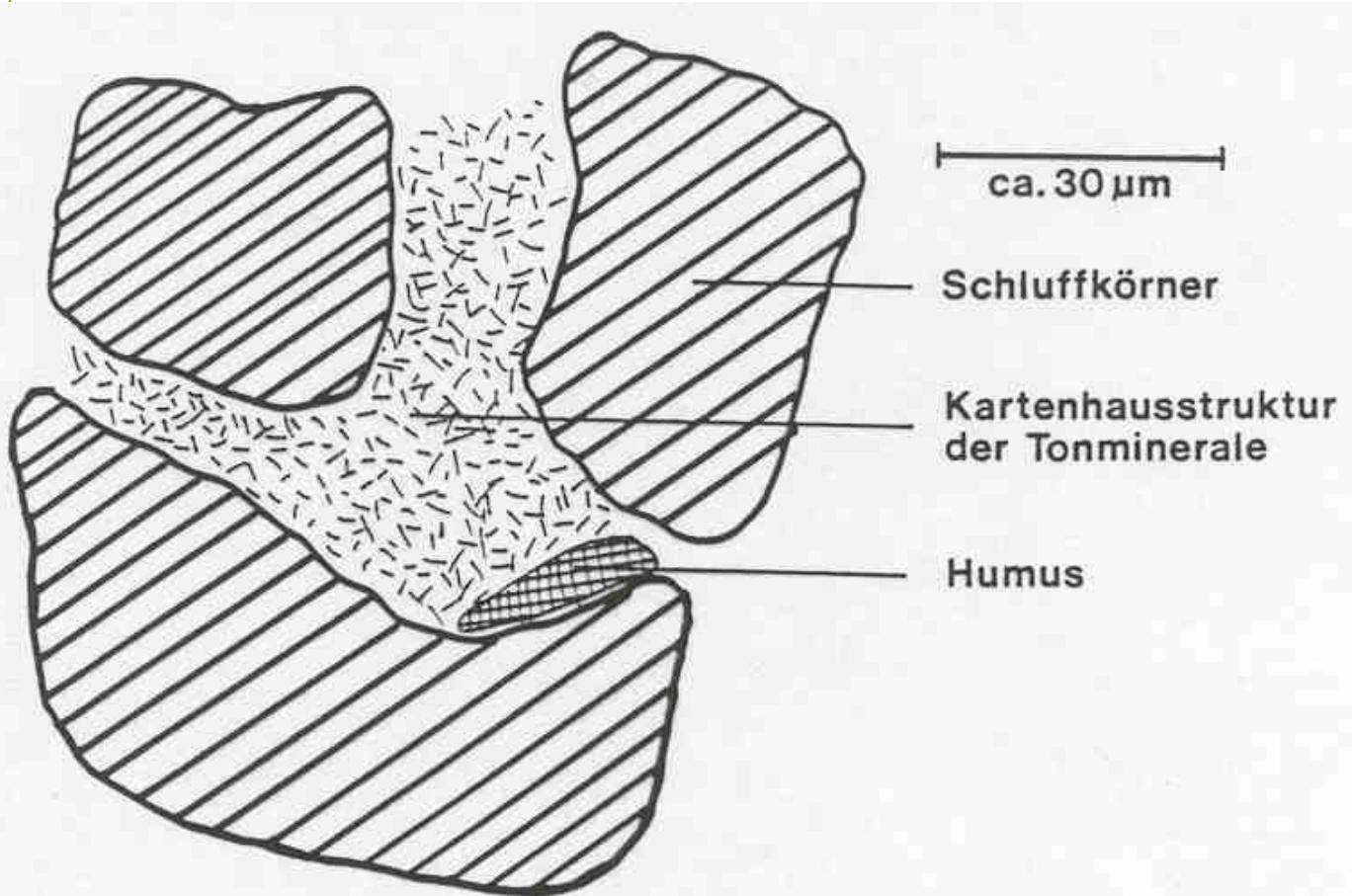
- Verbesserung der Bodeneigenschaften
 - Verbesserung der Bodenstruktur
 - Erhöhung des pH-Werts
 - Verbesserung der Nährstoffverfügbarkeit
 - Erhöhung der mikrobiellen Aktivität
 - Verringerung der Schwermetallverfügbarkeit
- Zufuhr von Ca^{2+} -Ionen
 - Zur Pflanzenernährung (untergeordnet)

Flockung durch Ca^{++} - Ionen - „Kalkgare“



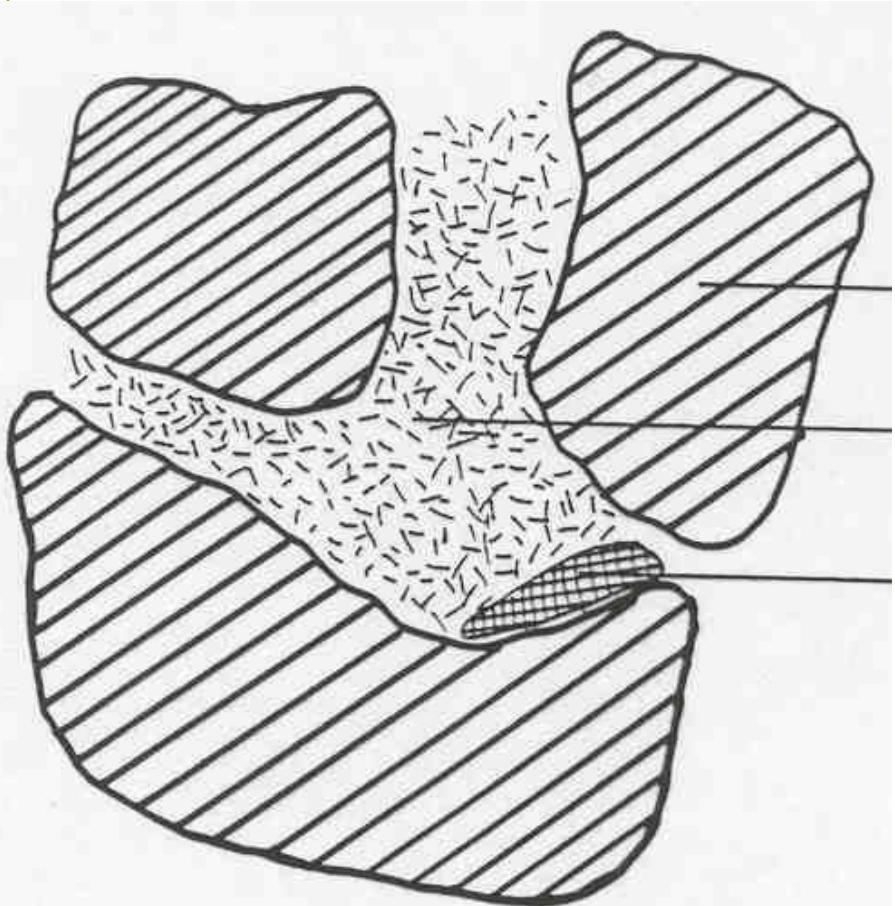
Kalkwirkungen: -Bodenstruktur

elf



Kalkwirkungen: -Bodenstruktur

if

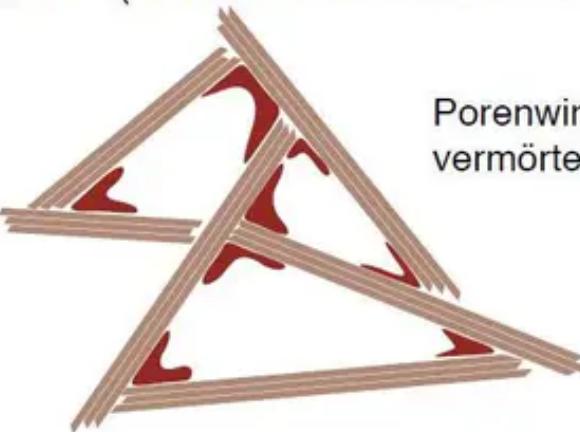


Fläche–Fläche (Kohärentgefüge)



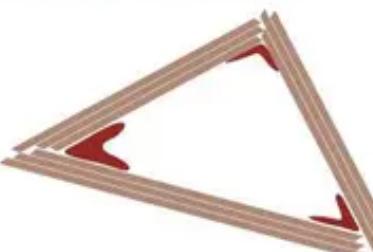
Ca-Carbonat/Silikat
Tonminerale

Fläche–Kante (stabile Kartenhausstruktur)

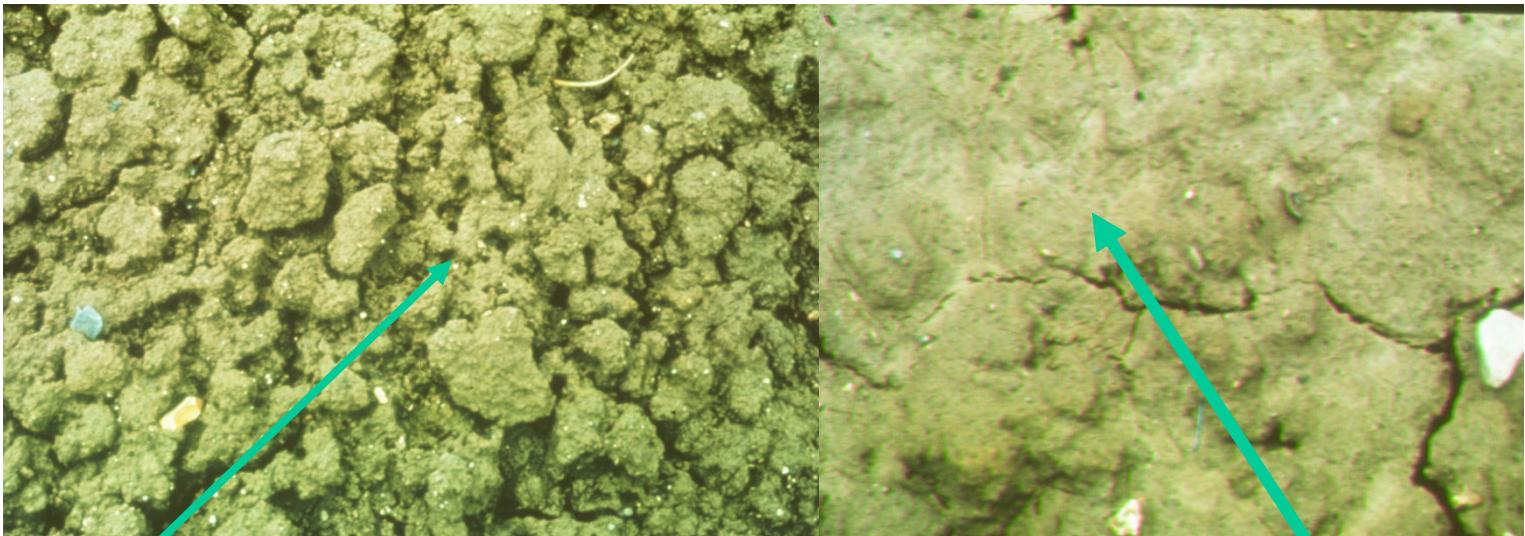


Porenwinkel-
vermörtelung

Kante–Kante (voluminös aber instabil)



Bodenoberfläche nach Winter



Regelmäßig gekalkt

30 Jahre nicht gekalkt





Kalkversuch Weihenstephan: 1978 – 1993, uL pH 5,5 → 6,5

Parameter	Kalk		Relativer Faktor
	Ohne	Mit	
Grobporen	2	4	2,00
Mittelporen	4	7	1,75
Feinporen	20	18	0,89
Wasserfiltration	100	196	1,96

Quelle: Verändert nach Gutser et al., 1997

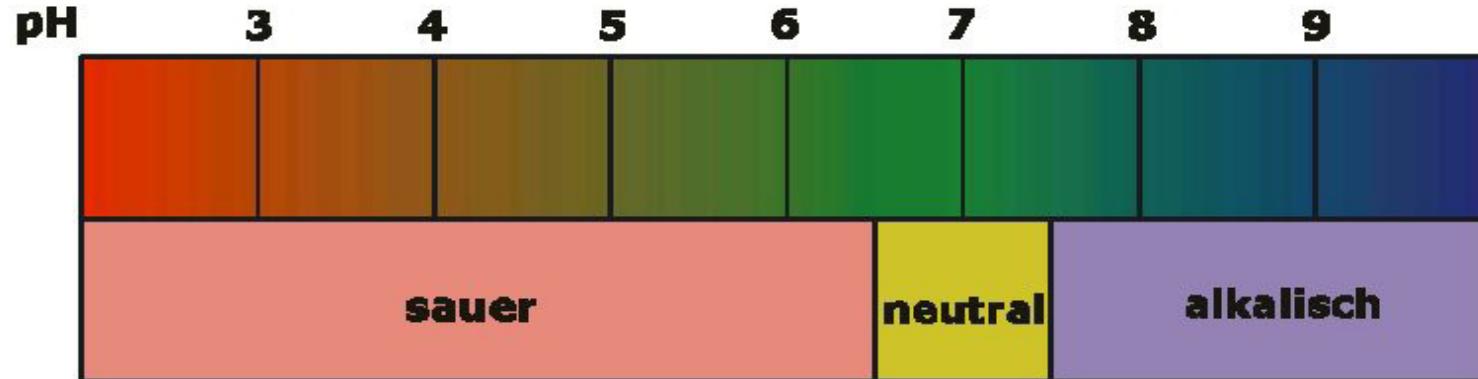
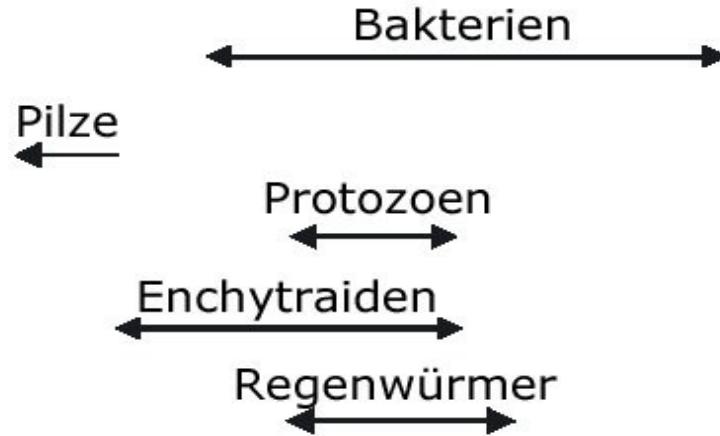
Kalkwirkungen: pH-Wert-Erhöhung

Kalk-form	Auflösung im Boden	Wirkungsgeschwindigkeit
CaCO_3	$\text{CaCO}_3 + \text{H}^+ \rightarrow$ $\text{Ca}^{++} + \text{HCO}_3^-$	Benötigt H^+ -Ionen zur Auflösung, löst sich langsam → keine schnelle pH-Erhöhung
CaO	$\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow$ $\text{Ca}^{++} + 2 \text{OH}^-$	Löst sich im Wasser → schnelle pH-Erhöhung → Gefahr der Überkalkung auf schlecht gepufferten = tonarmen Böden
CaSiO_3	$\text{CaSiO}_3 + 2 \text{H}^+ \rightarrow$ $\text{Ca}^{++} + \text{H}_2\text{O} + \text{SiO}_2$	Benötigt H^+ -Ionen zur Auflösung, löst sich noch langsamer als kohlensaurer Kalk
Ca_2SiO_4	$\text{Ca}_2\text{SiO}_4 + 4 \text{H}^+ \rightarrow$ $2 \text{Ca}^{++} + 2 \text{H}_2\text{O} + \text{SiO}_2$	

Ergebnis: es werden immer Protonen abgefangen und damit der pH-Wert erhöht

Auswirkung des pH-Wertes auf das Bodenleben

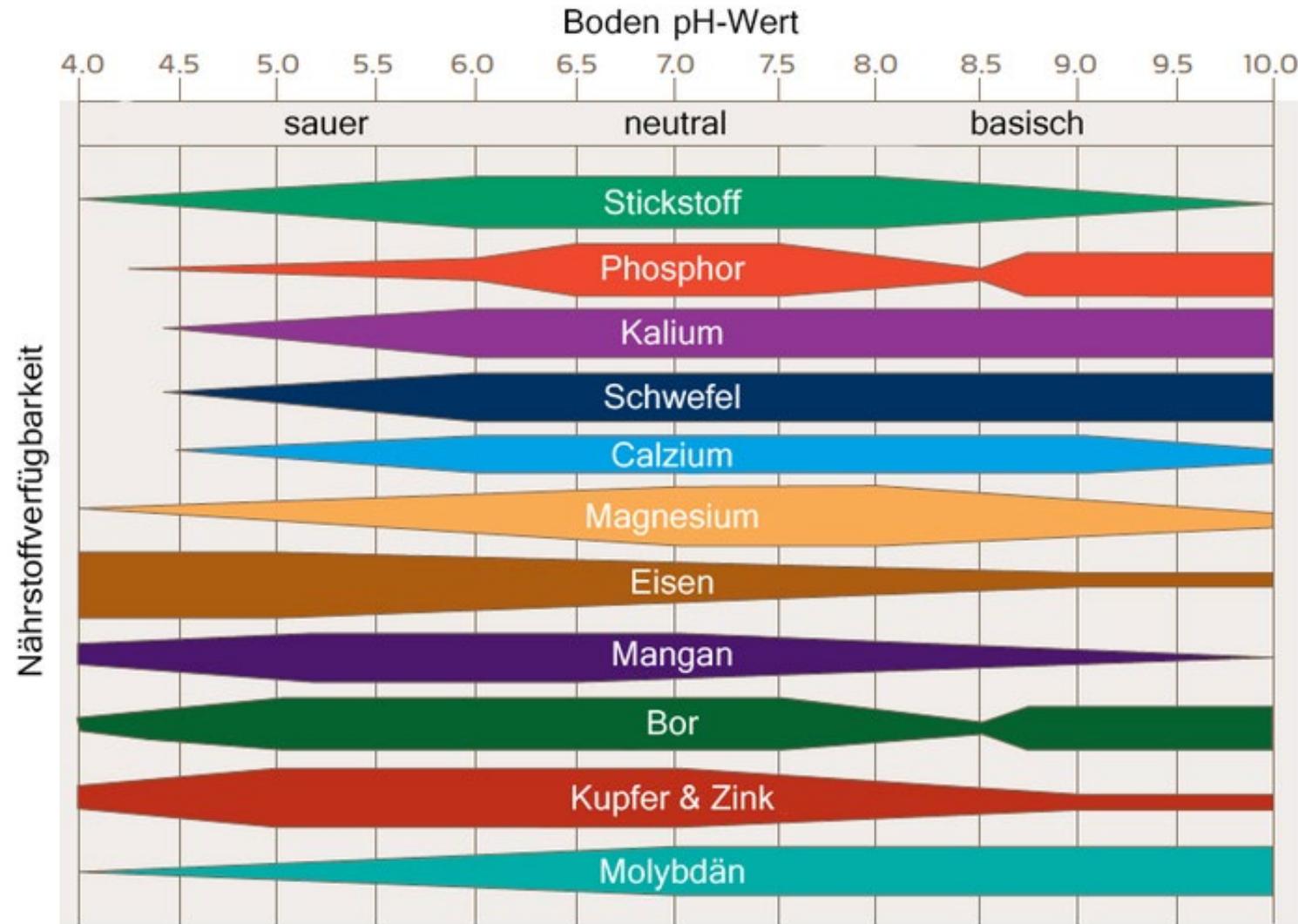
Bakterien	6 – 9
Pilze	< 5,5
Protozoen	6,5 – 7,5
Enchytraiden	5,5 – 7,5
Regenwürmer	6,5 – 8,0



Kalkversuch Weihenstephan: 1978 – 1993, uL pH 5,5 → 6,5

Parameter	Kalk		
	Ohne	Mit	Relativer Faktor
Grobporen	2	4	2,00
Mittelporen	4	7	1,75
Feinporen	20	18	0,89
Wasserfiltration	100	196	1,96
Mikrobielle Aktivität $\mu\text{g C/g}$ TM	127	310	2,44

Quelle: Verändert nach Gutser et al., 1997



Bodenversauerung entsteht durch...

- ...Auswaschung basisch wirkender Kationen (Ca, K, Mg, Na)
- ...„saureren Regen“ (HNO_3 , H_2SO_4 , Oxidation von NH_4^+ und NH_3 in der Atmosphäre)
- ...Lösung von CO_2 im Bodenwasser
- ...sauer wirkende Düngemittel
- ...Protonenbildung
 - Bei mikrobiellem Abbau von Biomasse zu organischen Säuren und Kohlensäure
 - Durch Oxidation von NH_4^+ und NH_3
 - $\text{NH}_4^+ + 2 \text{O}_2 \rightarrow \text{NO}_3^- + 2\text{H}^+ + \text{H}_2\text{O}$
 - $\text{NH}_3 + 2 \text{O}_2 \rightarrow \text{NO}_3^- + \text{H}^+ + \text{H}_2\text{O}$
 - Ausscheidung von Protonen durch Pflanzenwurzeln im Austausch gegen aufgenommene Kationen

Unvermeidbare Kalkverluste

durch Neutralisation und Auswaschung

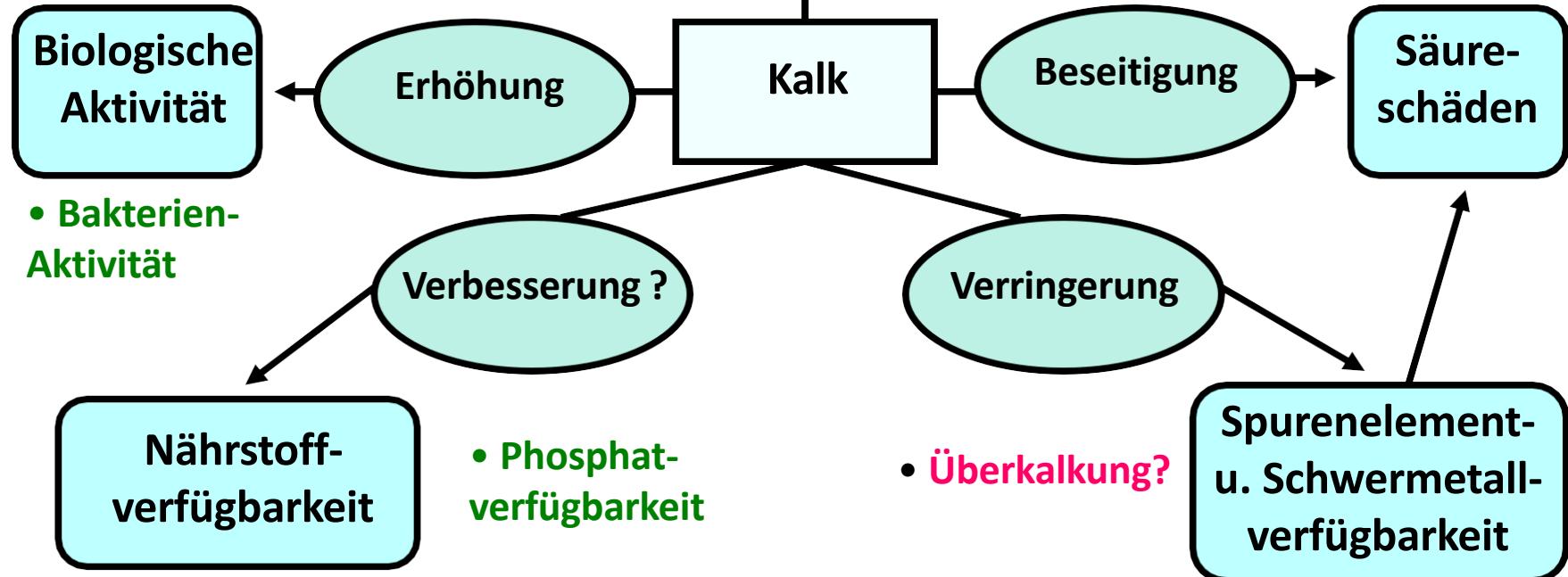
In Abhängigkeit von Bodennutzung und Niederschlagsmenge in kg/ha CaO*a

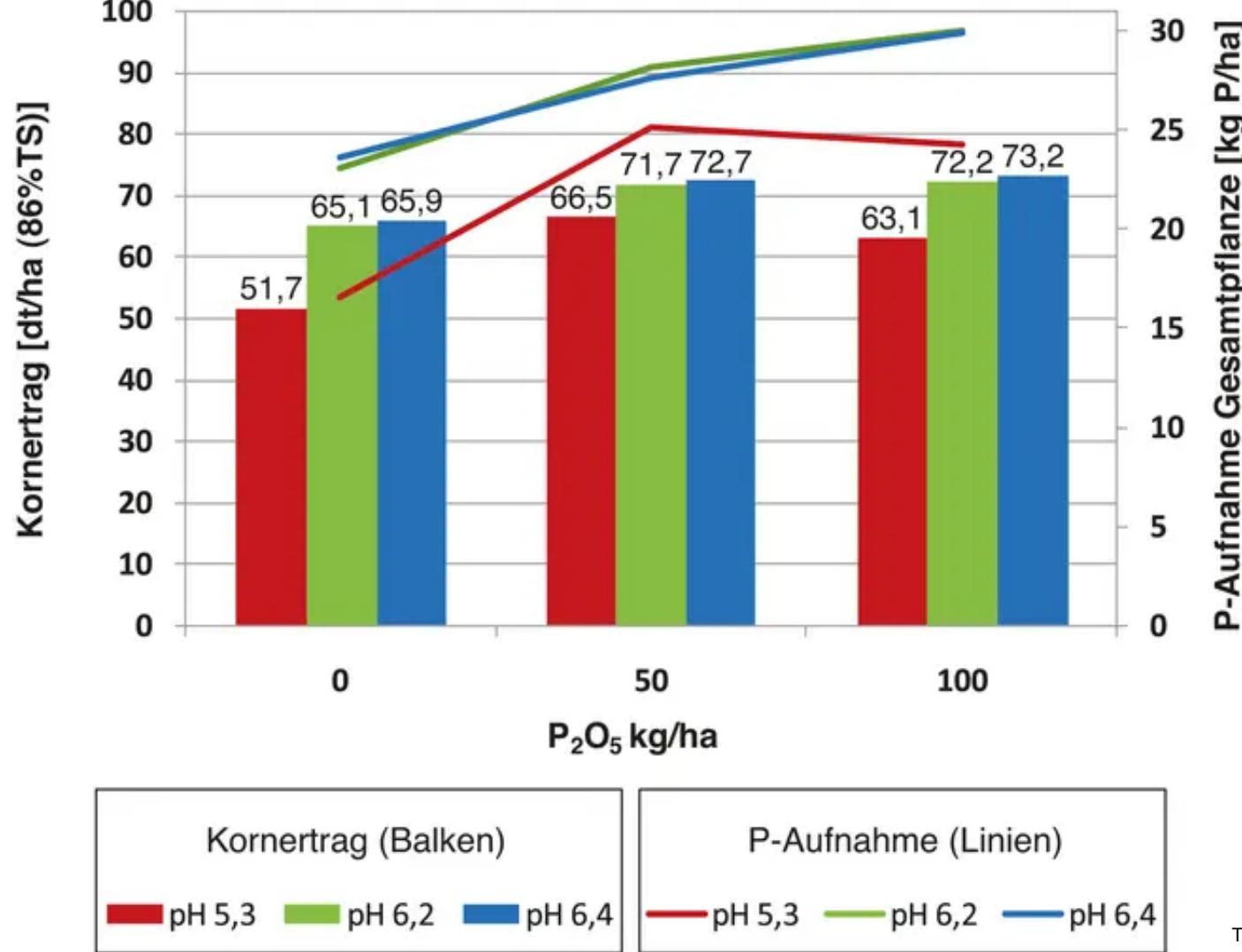
Bodenarten- gruppe (Symbol)	Nutzungs- form	Niederschläge		
		niedrig (< 600 mm)	mittel (600-750 mm)	hoch (>750 mm)
leicht (S,l`S)	Acker	300	400	500
		150	250	350
	Grünland	400	500	600
		200	300	400
	Acker	500	600	700
		250	350	450
mittel (sl bis t`L)	Grünland	400	500	600
		200	300	400
schwer (tL,T)	Acker	500	600	700
		250	350	450



Kalkwirkungen

- Luft-Haushalt
- Wurzel-Wachstum
- Infiltration
- Oberflächen-Abfluss





Einflussfaktoren auf den anzustrebenden pH-Bereich

Ton und Humus

zunehmender Tongehalt

Bedeutung für den pH-Wert



mehr Ca^{++}

für die **Stabilisierung** der Tonsubstanz



mehr Minerale, aus denen
Aluminium freigesetzt werden kann

zunehmender Humusgehalt



erhöhte Struktur- **Stabilisierung**

Tabelle 10: Gehaltsstufen für pH-Werte in Ackerböden (Humusgehalt $\leq 4\%$)

Bodenart	pH-Klasse		
	sehr niedrig / niedrig A/B	optimal (anzustreben) C	hoch / sehr hoch D/E
Sand	< 5,4	5,4 - 5,8	> 5,8
schwach lehmiger Sand	< 5,8	5,8 - 6,3	> 6,3
stark lehmiger Sand, sandiger Lehm, schluffiger Lehm (Lößlehm)	< 6,2	6,2 - 6,5 6,6 - 6,8 (-)	> 6,8 6,6 - 6,8 (+)
toniger Lehm bis Ton	< 6,6	6,6 - 6,7 6,8 - 7,2 (-)	> 7,2 6,8 - 7,2 (+)

(-) kein freier Kalk (nach Salzsäure-Test)

20

(+) freier Kalk (nach Salzsäure-Test)

Quelle: „Gelbes Heft“

Tabelle 13: Höhe der Gesundungs- und Erhaltungskalkung (Ackerland, Humusgehalt $\leq 4\%$,
Humusgehalt = $C_{org} \times 1,72$)

Bodenart	Gesundungskalkung (Gehaltsstufe A/B)		Erhaltungskalkung (Gehaltsstufe C)		keine Kalkung erforderlich (Gehaltsstufe D/E)
	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. 6,6 - 6,8 (+)
toniger Lehm bis Ton	< 6,6	100	6,6 - 6,7 u. 6,8 - 7,2 (-)	20	> 7,2 u. 6,8 - 7,2 (+)

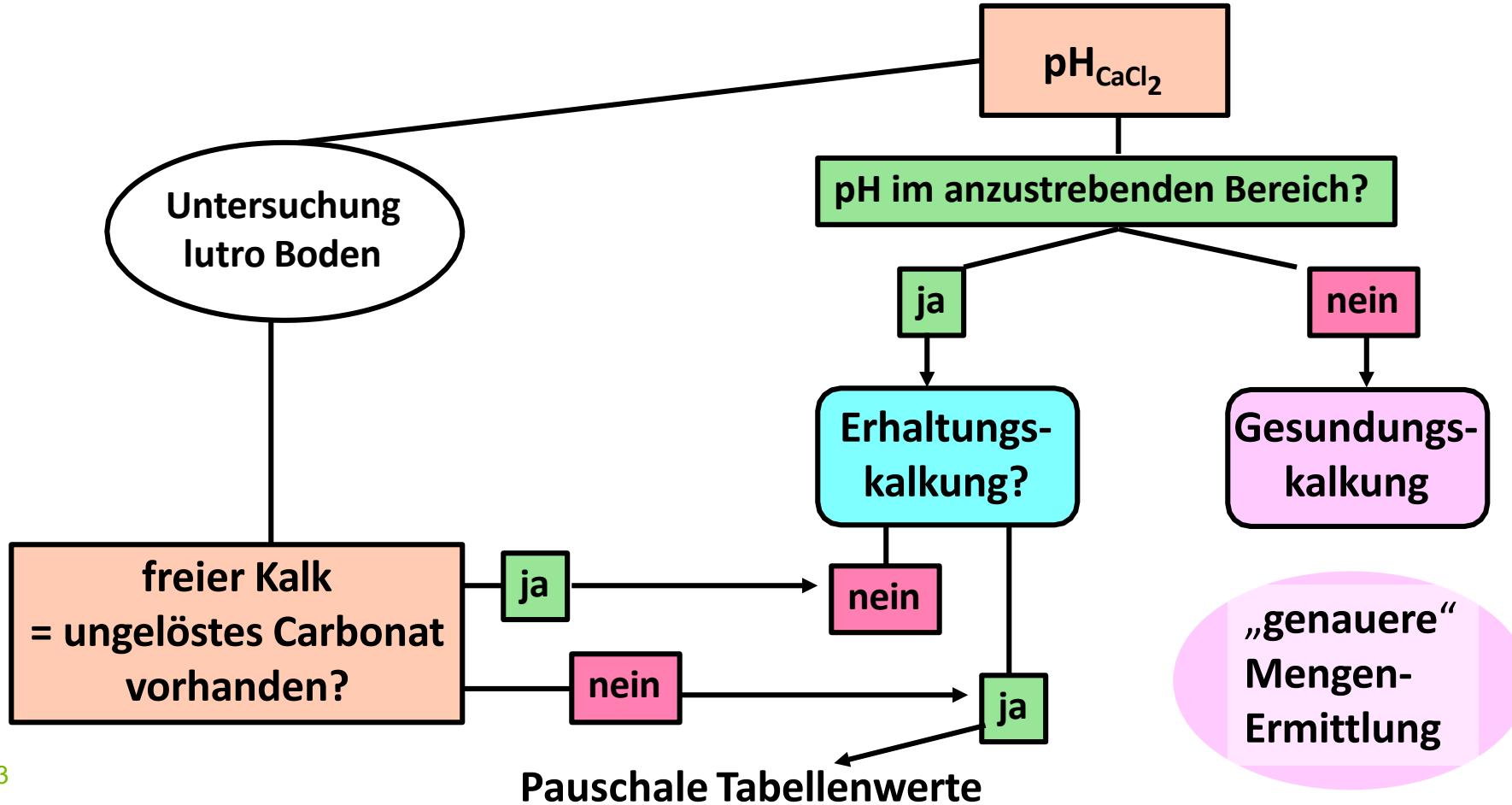
21 (-) kein freier Kalk (nach Salzsäure-Test): Erhaltungskalkung erforderlich

(+) freier Kalk (nach Salzsäure-Test): Erhaltungskalkung nicht erforderlich

Tabelle 11: Anzustrebende pH-Werte für humose, anmoorige Böden und Moor bei Ackernutzung und Erhaltungskalkung (dt CaO/ha) für 3 Jahre (Humusgehalt = $C_{org} \times 1,72$)

Bodenart des mineralischen Anteils	Humusgehalt in %					
	4,1 - 15,0		15,1 - 30,0		> 30	
	pH-Bereich	Erhaltungskalkung	pH-Bereich	Erhaltungskalkung	pH-Bereich	Erhaltungskalkung
Sand	4,7 - 5,4	5	4,3 - 4,7	3		
schwach lehmiger Sand	5,0 - 5,9	8	4,6 - 5,1	4		
stark lehmiger Sand bis schluffiger Lehm	5,3 - 6,4	13	4,9 - 5,6	6		
toniger Lehm bis Ton	5,7 - 6,7	17	5,3 - 5,9	7		
Hochmoor und saures Niedermoor					4,3	keine

Beurteilung des Kalkzustandes und Kalkbedarfsermittlung





mit 10 %iger Salzsäure

A close-up photograph of a soil sample being tested. A white plastic test tube with a red rubber bulb at the end is being inserted into the dark brown, crumbly soil. The bulb is filled with a clear liquid, likely 10% sulfuric acid. Bubbles are visible on the surface of the soil where the liquid has been applied. In the background, green plant stems and leaves are visible. The text 'mit 10 %iger Salzsäure' is overlaid in the upper right area of the image.

Kalkdüngemittel

Düngemittel	Kalkform	Kalkgehalt berechnet als CaO %	Nebenbestandteile	Wirkung
Kohlensaurer Kalk	CaCO_3	42–53	MgCO_3	langsam
Kohlensaurer Mg-Kalk	$\text{CaCO}_3 + \text{MgCO}_3$	42–53	z. T. mit P_2O_5	langsam
Branntkalk	CaO	65–95		rasch
Magnesium-Branntkalk	CaO + MgO	65–95		rasch
Löschkalk	$\text{Ca}(\text{OH})_2$	60–70		rasch
Mischkalk	CaO + CaCO_3	60–65		rasch und langsam
Hüttenkalk	Ca_2SiO_4	40–50	MgO, Spuren-nährstoffe, z. T. P_2O_5	langsam
Konverterkalk	CaO + Ca_2SiO_4	35–50	z. T. P_2O_5 z. T. MgO, Spuren-nährstoffe	rasch und langsam
Rückstandkalk	CaCO_3 , CaO	> 30	z. T. N, P_2O_5 , MgO	meist langsam
Carbokalk	CaCO_3	> 25	N, P_2O_5 , MgO	langsam

Günstige Zeiträume für Kalkdüngung

Fruchtarten	Monate	Juli	August	September	Oktober	November	Dezember	Januar	Februar	März	April	Mai	Juni
zu Stopfelfrüchten				Vorsaat									
zu Raps				Vorsaat									
zu Wintergerste				Vorsaat				Kopfkalkung					
zu Roggen					Vorsaat			Kopfkalkung					
zu Weizen					Vorsaat				Kopfkalkung				
zu Sommergerste und Hafer					Stoppel		Winter		Vorsaat				
zu Zucker- und Futterrüben					Stoppel		Winter		Vorsaat				
zu Mais					Stoppel					Vorsaat			
zu Körnerhülsenfrüchten					Stoppel		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 Wein- und Hopfenanbau							beim Rigolen und ihr Ertragsalter						
im Forstbetrieb								das ganze Jahr					

Kalkzehrung verschiedener Stickstoffdüngemittel

Kategorie	Produkt	Kalkzehrung je 100 kg N / P ₂ O ₅ / K ₂ O
Stickstoff und N/S-Dünger	Schwefelsaures Ammoniak, ssA	-299
	Ammonsulfatsalpeter/ASS/ENTEC 26	-196
	Piamon 33 S = Harnstoff + ssA	-164
	Harnstoff	-100
	Sulfan	-87
	Kalkammonsalpeter ohne MgO	-55
Phosphat/ NP-Dünger	Kalkammonsalpeter mit MgO	-48
	Diammoniumphosphat (DAP)	-210

Magnesium

Mg- Funktionen

- Baustein: Chlorophyll, Phytin
- Wasserhaushalt
- Enzymaktivierung: Koppelung von Enzym und Substrat, speziell bei Eiweißsynthese und der Energieübertragung: Mg++ bindet ATP an Enzyme oder Substrate (Brückenfunktion) und wirkt so aktivierend.

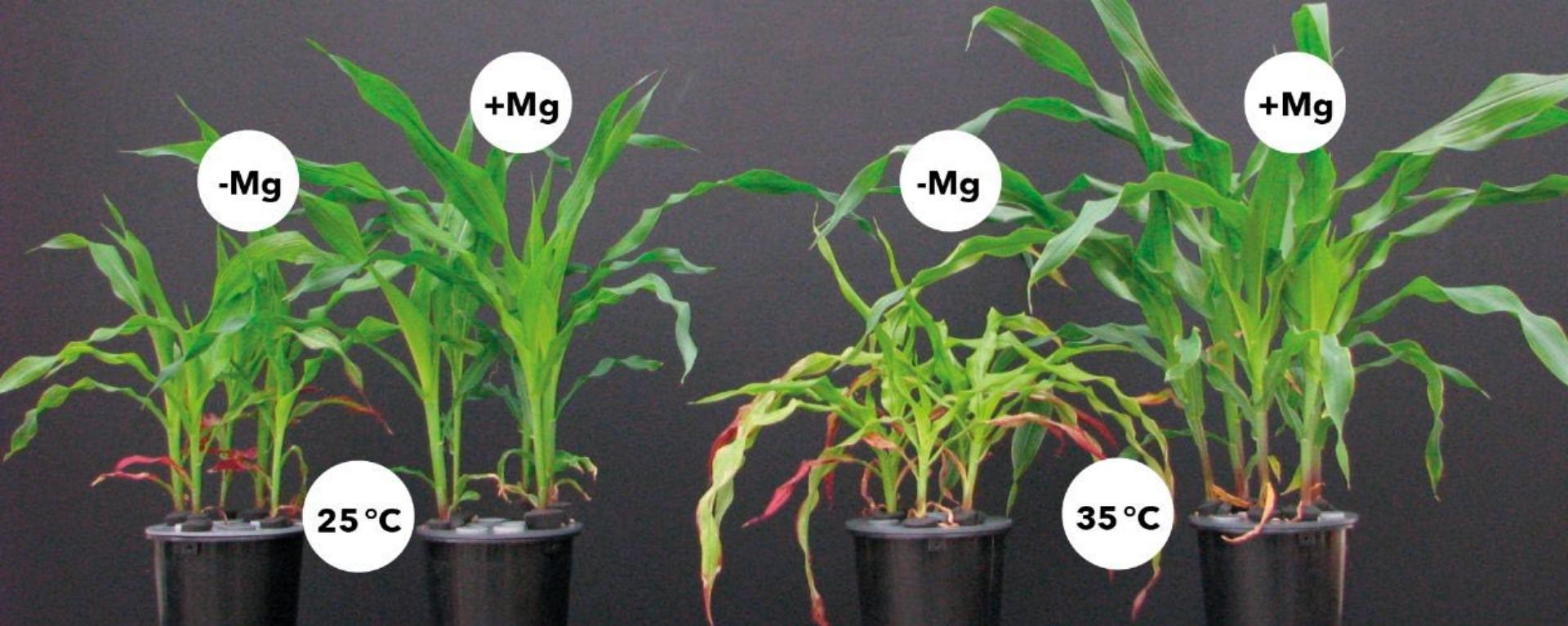
Interkostalchlorosen bei Magnesiummangel



of

Ho

31



Magnesiumdüngeempfehlung

- Hackfrüchte, Mais und viele Sonderkulturen haben hohen Mg- Bedarf
- Durchschnittliche Mg-Entzüge (Abfuhr) Ackerland 20 - 60 kg MgO/ha

Tabelle 14: Gehaltsklassen für CaCl_2 -lösliches Magnesium und Bemessung der Mg-Düngung bei Acker und Dauergrünland

Gehaltsklasse	Mg-Gehalte (mg/100 g Boden) (S, I'S)	Mg-Gehalte (mg/100 g Boden) (IS - T)	Mg-Düngung kg MgO/ha
A	< 3	< 5	Abfuhr + 30
B	3 - 6	5 - 9	Abfuhr + 30
C	7 - 10	10 - 20	Abfuhr
D	11 - 30	21 - 30	0
E	> 30	> 30	0

Magnesiumdünger

- Blattdünger
- Dolomit - KAS

Düngemittel	MgO-Gehalt %	Bindungsform	Eigenschaften, Nebenbestandteile
Kieserit	25–28	Magnesiumsulfat	gut löslich
Bittersalz	16	Magnesiumsulfat	gut löslich, 13% Schwefel
Mg-Branntkalk Kohlensaurer Mg-Kalk	10–35	Magnesiumoxid oder Magnesiumcarbonat	schnell wirkend langsam wirkend
Magnesium-Gesteinsmehl	20	Magnesiumsilikat	schwer löslich, langsam wirkend
Patentkali (Kalimagnesia)	10	Magnesiumsulfat	30% K ₂ O, 17% S als Sulfat
Stickstoffmagnesia	7	Magnesiumsulfat, Magnesiumcarbonat	20% N (7–10% Nitrat, 10–13% Ammonium)
Magnesia-Kainit	5	Magnesiumsulfat	11% K ₂ O, 20% Na
PK-Dünger mit Magnesium	3–10	Magnesiumsulfat, Magnesiumphosphat	
Hüttenkalk	7	Magnesiumsilikat	47% CaO
Korn-Kali	6	Magnesiumsulfat	40% K ₂ O
NPK- Dünger mit MgO	2–4	Magnesiumsulfat, Magnesiumcarbonat	
Thomasphosphat	2	Magnesiumphosphat, Magnesiumsilikat	15% P ₂ O ₅
Thomaskali	3–6	Magnesiumphosphat	8–12% P ₂ O ₅ , 11–20% K ₂ O

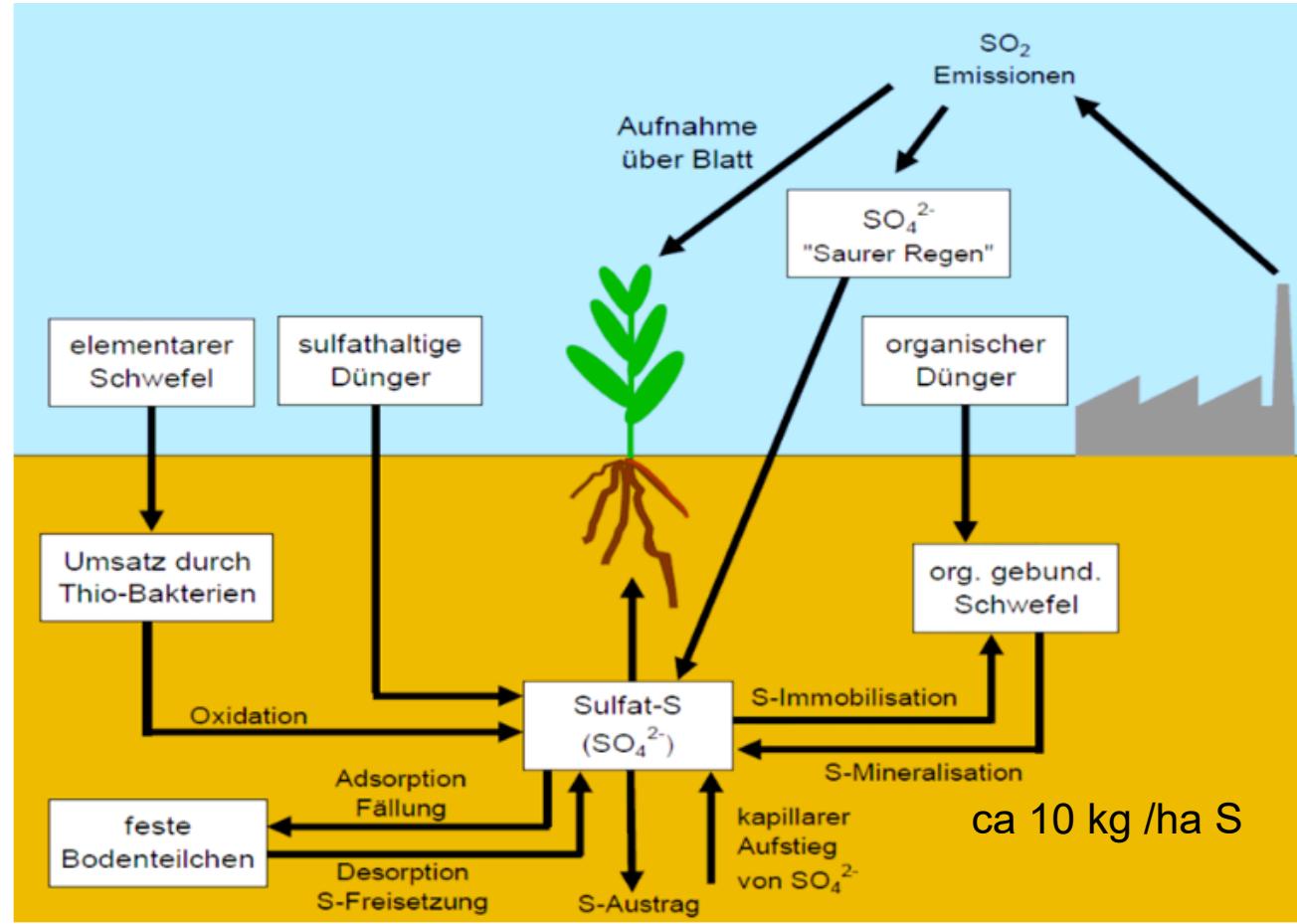
Schwefel

Schwefel – Funktionen in der Pflanze

- essenzieller Baustein beim Aufbau von Aminosäuren
- Nitratreduktase
- Synthese von Zucker, Stärke, Vitaminen und Geschmacksstoffen
- zur Ölbildung
 - Senföle
 - Lauchöle

Schwefelkreislauf

- aus dem Boden:
 - Sulfat SO_4^{2-}
- Übers Blatt – bzw. aus der Luft
 - SO_2
 - H_2S
 - SO_4^{2-}



Schwefelmangel





Kalkzehrung verschiedener Stickstoffdüngemittel

Schwefelbedarf	Reaktion auf S-Düngung	Kultur	typische N:S-Verhältnisse
hoch	ausgeprägt	Raps/Rübsen/Senf	5:1
		Grünland	8 – 12:1
		Leguminosen	5 – 8:1
		Kohlarten/Zwiebelgewächse	5:1
mittel	gering	Zuckerrüben	10:1
gering	mittel	Getreide/Mais	10:1
gering	gering	Kartoffeln	10:1

Kalkzehrung verschiedener Stickstoffdüngemittel

Boden	Schwefeldüngungsbedarf der Kulturen in kg S/ha			
	gering	mittel	hoch	
	z. B. Z-Rüben, Kartoffeln, Mais, Sommergetreide	z. B. W-Weizen, W- Roggen	z. B. W-Gerste, Leguminosen	z. B. W-Raps
leicht	10 - 20	10 - 30	20 - 40	40 - 60
mittel	0 - 10	5 - 20	10 - 30	25 - 50
schwer	0	0 - 10	5 - 20	20 - 40

Kalkzehrung verschiedener Stickstoffdüngemittel

Verfahren	Vorteile	Nachteile
Schwefel-Schätzrahmen	sehr einfaches Verfahren keine Kosten jederzeit einsetzbar	objektive Beurteilung und Punktevergabe nicht immer gewährleistet
Smin-Bodenuntersuchung	Erfassung der tatsächlich verfügbaren Vorräte an Sulfat im Boden	rel. aufwendige Probenahme
Pflanzenanalyse	exakte Erfassung des S-Versorgungszustandes der Pflanzen	nicht für alle Pflanzenarten und Wachstumsstadien verlässliche Vergleichswerte aufwendige Probenahme Beratungsergebnis kommt oft zu spät für zeitgerechte S-Düngung Analysekosten

Warum die Bodenanalyse nicht zur Bestimmung der S-Versorgung geeignet ist:

- Ursache:
 - Sulfat verhält sich in landwirtschaftlichen Böden mit pH-Werten oberhalb von 5 hochmobil und folgt der Wasserbewegung im Boden!
- Problem:
 - hohe Mobilität des Bodensulfats
 - hohe räumliche Variabilität des SO_4 -S
 - hohe zeitliche Variabilität des SO_4 -S

Beispiele für schwefelhaltige N-Dünger

(Gehaltsangaben in Gewichts-% nach Herstellerangaben bzw. Volumen-%)

Dünger	Gewichts-% (kg/dt) ¹		Volumen-% (kg/100 l) ¹		ausgebrachte S-Menge bei vorgegebener N-Menge	
	S	N	S	N	60 kg N/ha = ... kg S/ha	100 kg N/ha = ... kg S/ha
Ammoniumsulfat (Schwefelsaures Ammoniak, SSA)	24	21			69	114
Ammonsulfatsalpeter (ASS)	13	26			30	50
ASS stabilisiert (ENTEC 26)	13	26			30	50
Harnstoff-Ammoniumsulfat (PIAMON 33-S)	12	33			22	36
KAS + S (z. B. YaraBela Sulfan)	6	24			15	25
Ammoniumthiosulfat (ATS)	26	12	34,3	16	130	216
Ammoniumsulfatlösung (ASL)	9	8	11,3	10	68	113
Ammoniumsulfat-Harnstoff- Lösung (DOMAMON L26)	6	20	7,5	25	18	30
AS-Düngerlösung (Lenasol)	6	15	7,5	19	24	40
AHL + Schwefel (PIASAN-S 25/6, ALZON flüssig-S 25/6)	6	25	7,9	33	14	24

¹ Die Gehaltsangaben in Gewichts-% sind für die Ausbringung flüssiger Düngemittel wenig hilfreich, weil sich die Ausbringmengen auf Liter beziehen. Hier interessiert der Gehalt in Volumen-%. Die Umrechnung erfolgt über die Dichte. Angaben hierzu sowie zu den Kalkwerten s. Kapitel „Stickstoffdüngemittel“.

Vielen Dank für die Aufmerksamkeit