

# 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  $\text{CaCO}_3$  (Calcit in Kalksteinen vor)
- $\text{CaCO}_3$  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

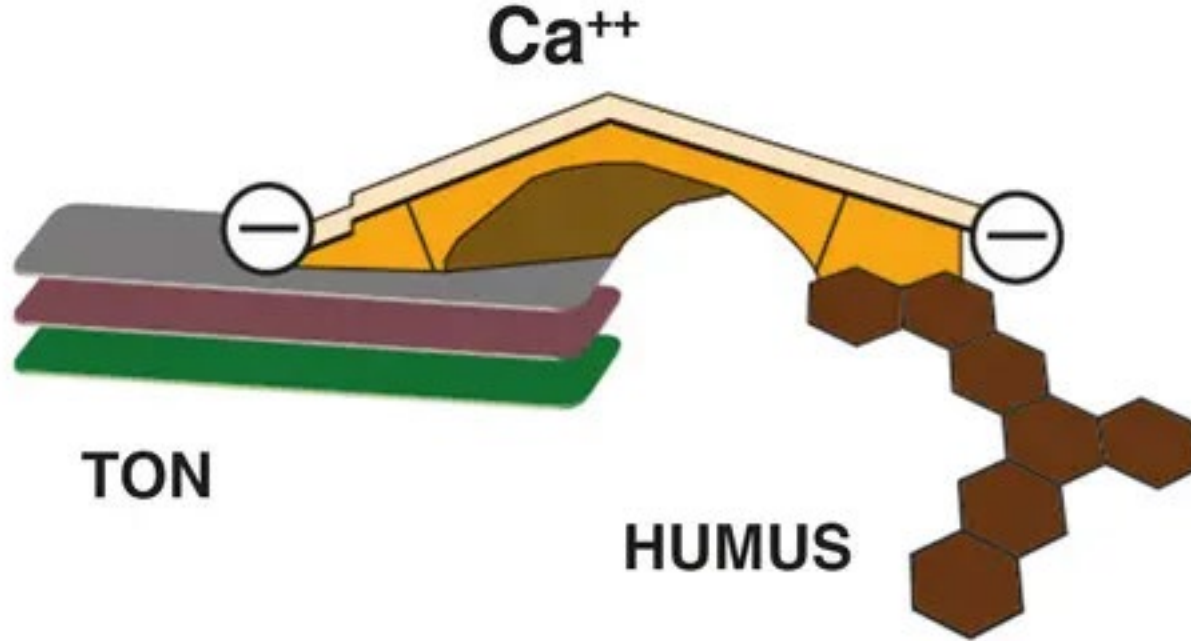
# Calcium in der Pflanze

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

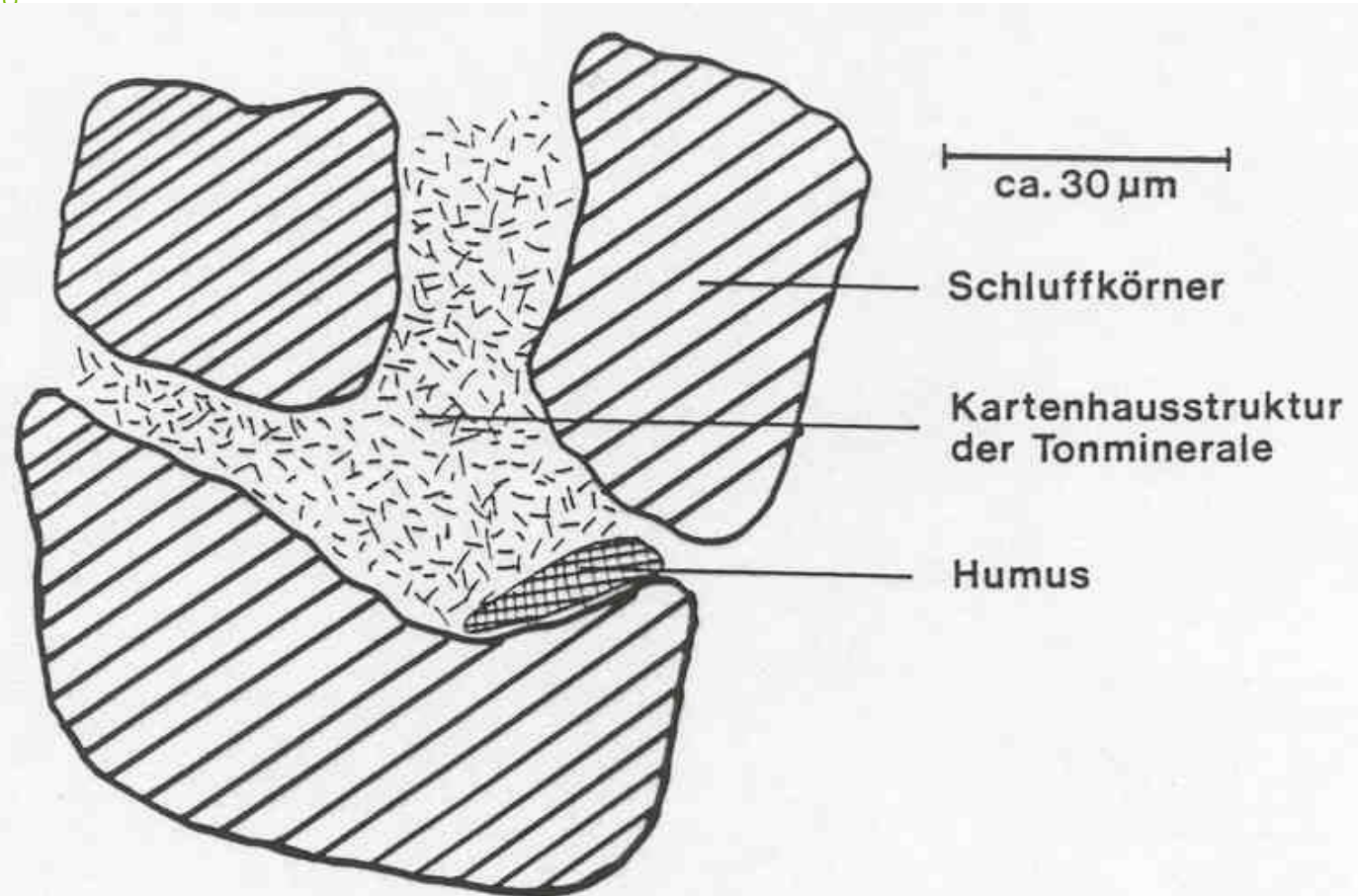
# Ziele der Ca- Düngung (Kalkung)

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

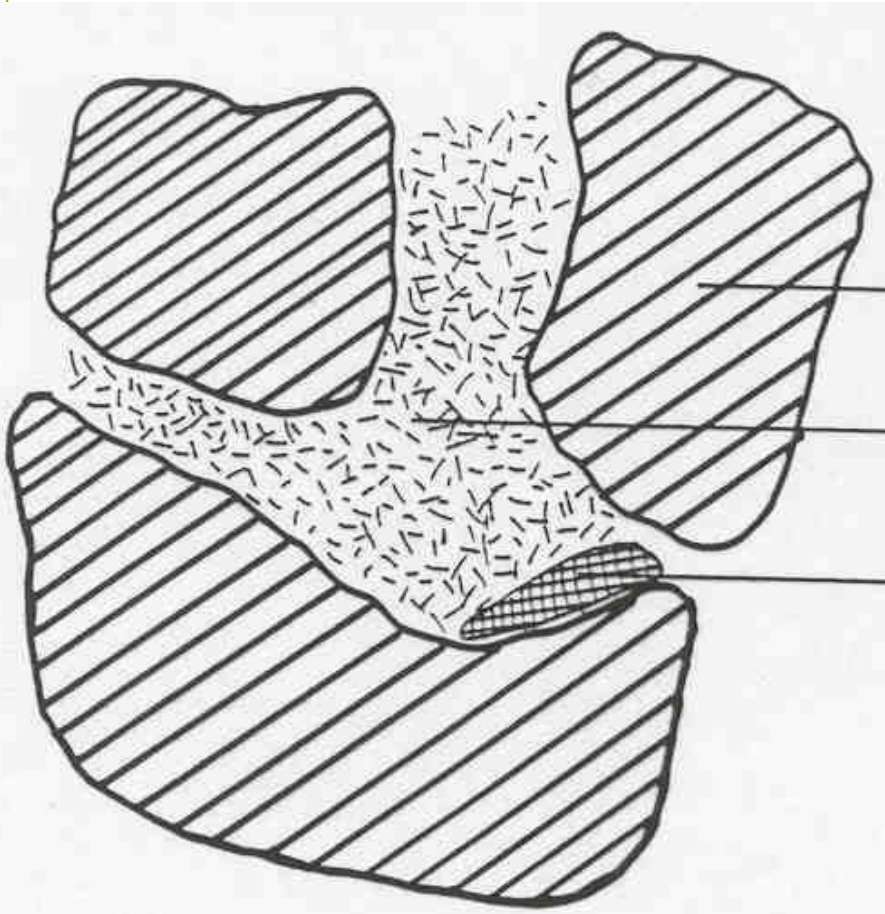
# Flockung durch $\text{Ca}^{++}$ - Ionen - „Kalkgare“



# Kalkwirkungen: -Bodenstruktur



# Kalkwirkungen: -Bodenstruktur



Fläche–Fläche (Kohärentgefüge)



Ca-Carbonat/Silikat  
Tonminerale

Fläche–Kante (stabile Kartenhausstruktur)



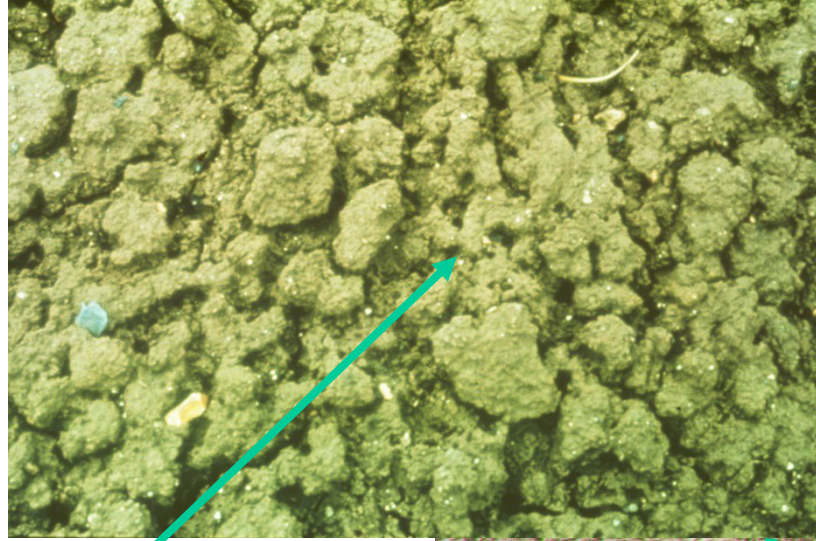
Porenwinkel-  
vermörtelung

Kante–Kante (voluminös aber instabil)

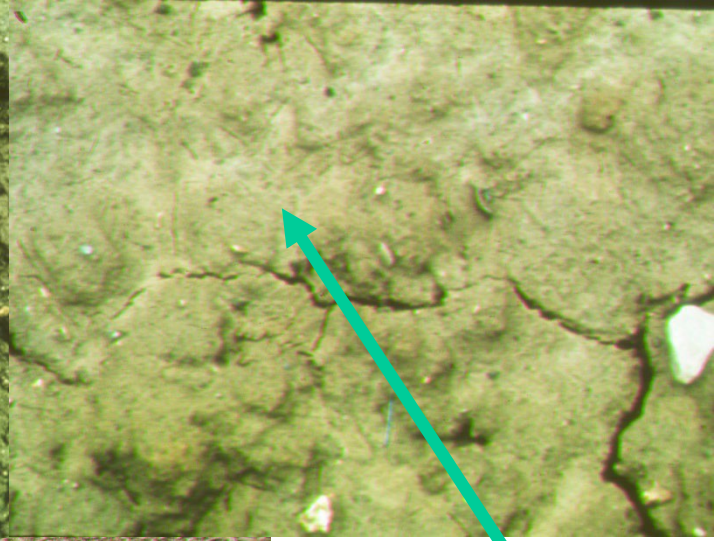




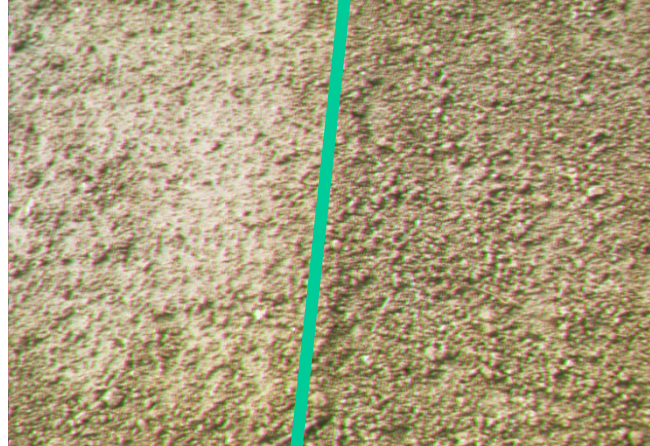
# Bodenoberfläche nach Winter



**Regelmäßig gekalkt**



**30 Jahre nicht gekalkt**







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

	Kalk		
Parameter	Ohne	Mit	Relativer Faktor
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

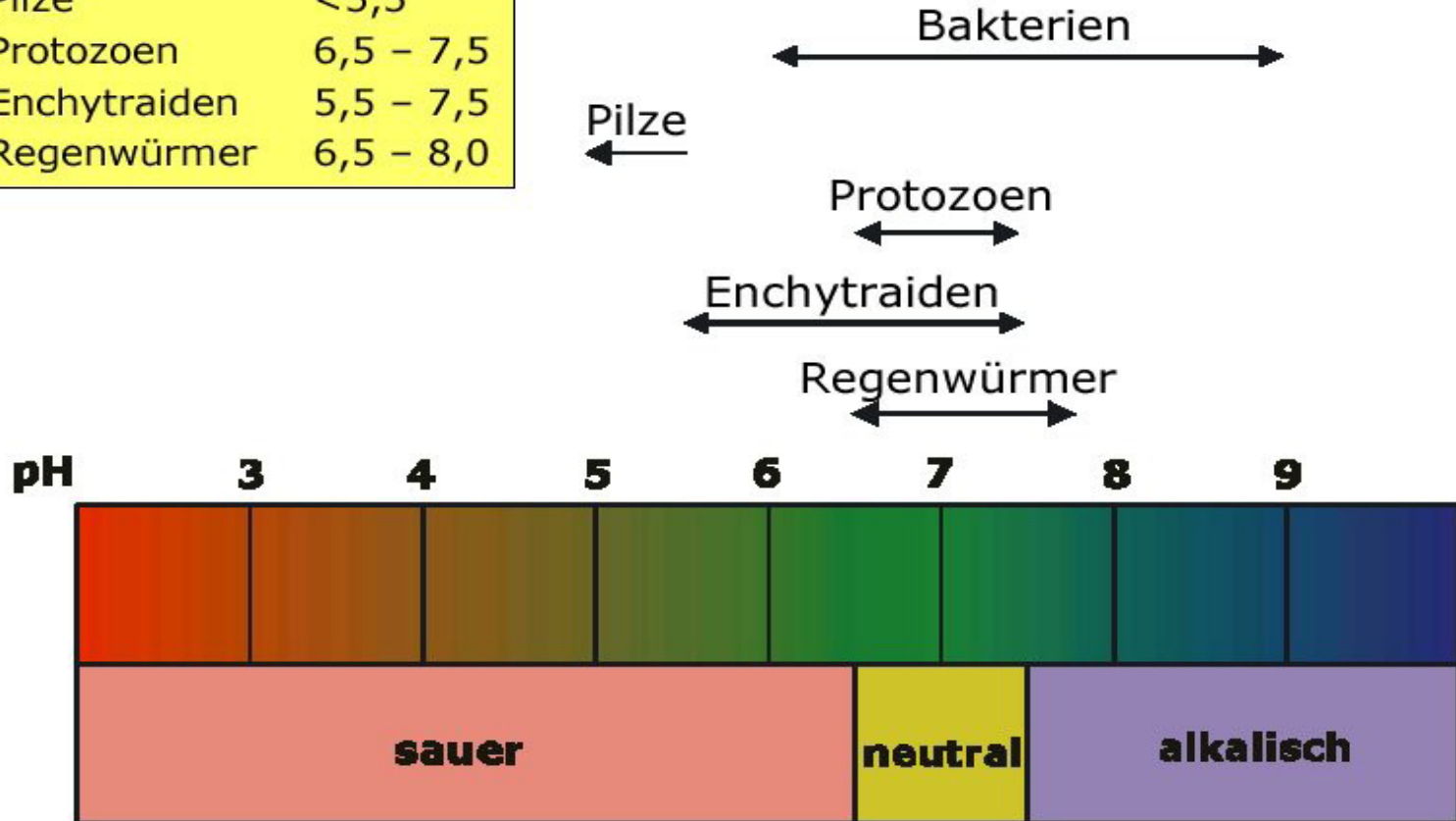
Kalk-form	Auflösung im Boden	Wirkungsgeschwindigkeit
<b>CaCO<sub>3</sub></b>	$\text{CaCO}_3 + \text{H}^+ \rightarrow \text{Ca}^{++} + \text{HCO}_3^-$	Benötigt H <sup>+</sup> -Ionen zur Auflösung, löst sich langsam → keine schnelle pH-Erhöhung
<b>CaO</b>	$\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca}^{++} + 2 \text{OH}^-$	Löst sich im Wasser → schnelle pH-Erhöhung → Gefahr der Überkalkung auf schlecht gepufferten = tonarmen Böden
<b>CaSiO<sub>3</sub></b>	$\text{CaSiO}_3 + 2 \text{H}^+ \rightarrow \text{Ca}^{++} + \text{H}_2\text{O} + \text{SiO}_2$	Benötigt H <sup>+</sup> -Ionen zur Auflösung, löst sich noch langsamer als kohlensaurer Kalk
<b>Ca<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub></b>	$\text{Ca}_2\text{SiO}_4 + 4 \text{H}^+ \rightarrow 2 \text{Ca}^{++} + 2 \text{H}_2\text{O} + \text{SiO}_2$	

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



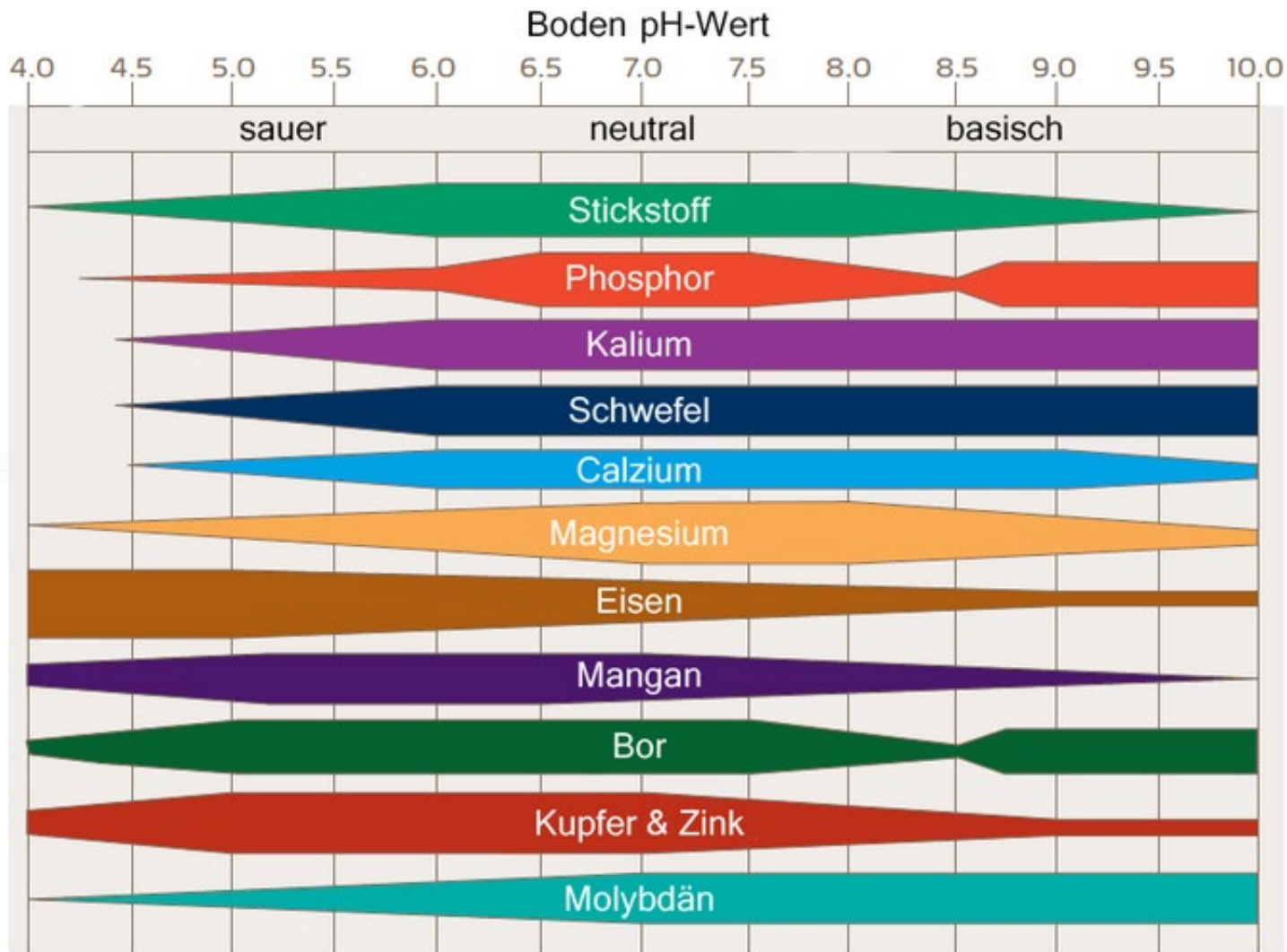
## Kalkversuch Weihenstephan: 1978 – 1993, uL pH 5,5 → 6,5

	Kalk		
Parameter	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



Nährstoffverfügbarkeit



# Bodenversauerung entsteht durch...

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

# Unvermeidbare Kalkverluste

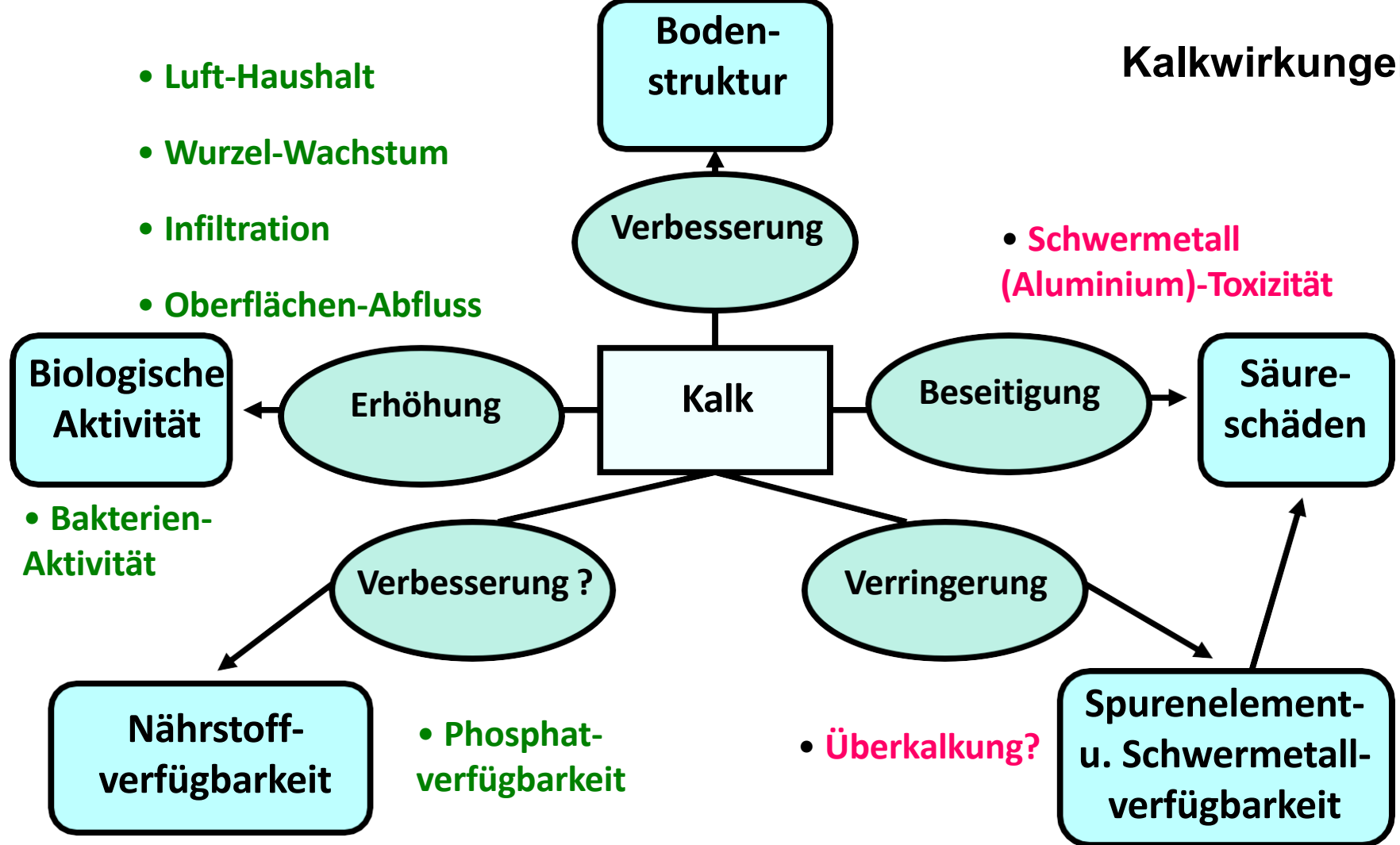
durch Neutralisation und Auswaschung

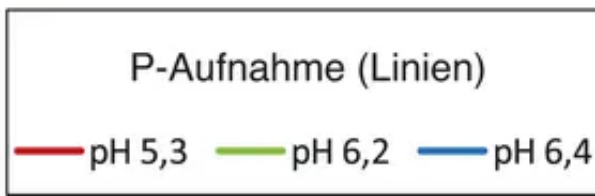
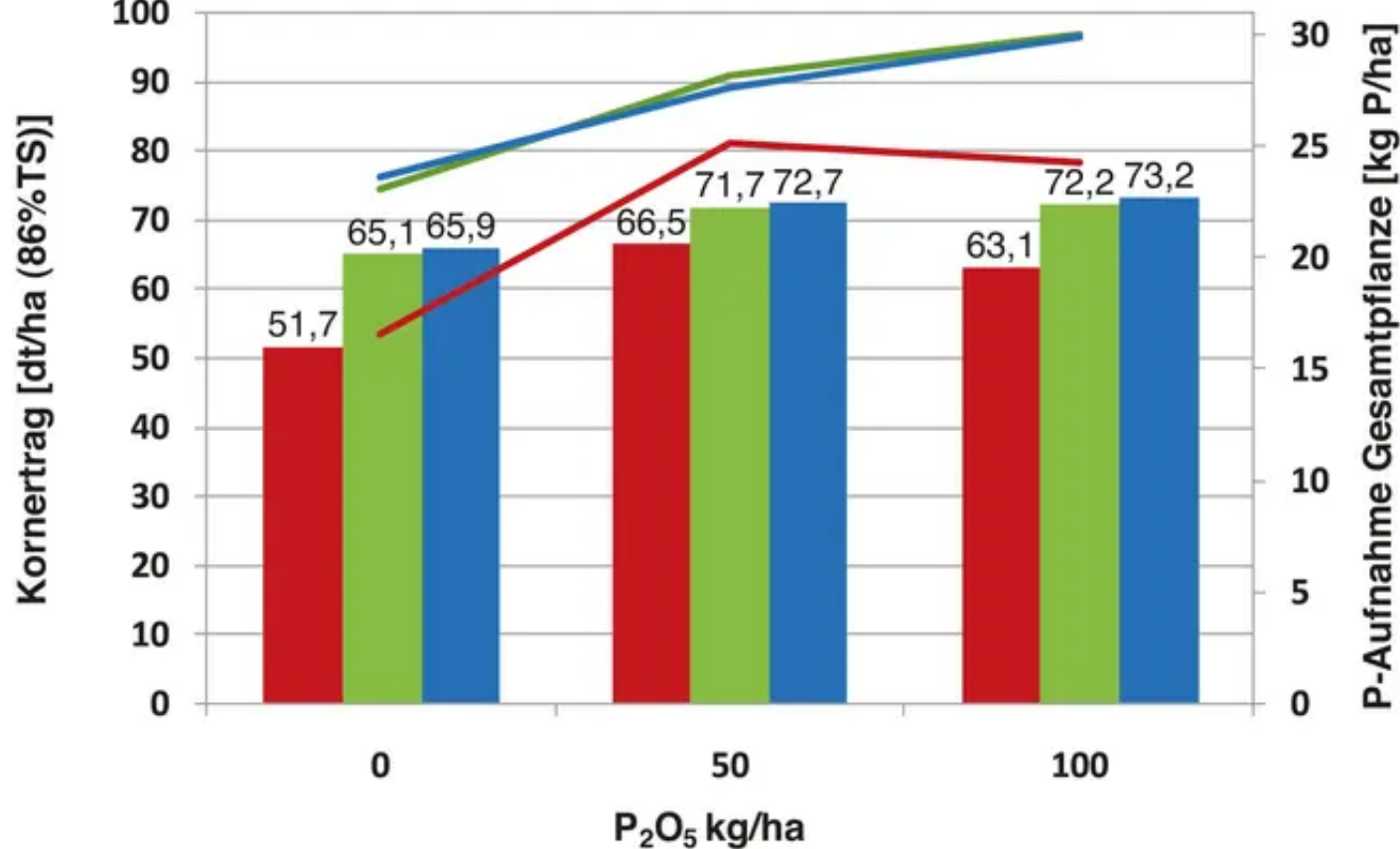
In Abhängigkeit von Bodennutzung und Niederschlagsmenge in kg/ha CaO\*a

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



# Kalkwirkungen







# Einflussfaktoren auf den anzustrebenden pH-Bereich

## Ton und Humus

## Bedeutung für den pH-Wert

zunehmender Tongehalt



mehr  $\text{Ca}^{++}$   
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)

(+) freier Kalk (nach Salzsäure-Test)

Quelle: „Gelbes Heft“

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

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 (+)

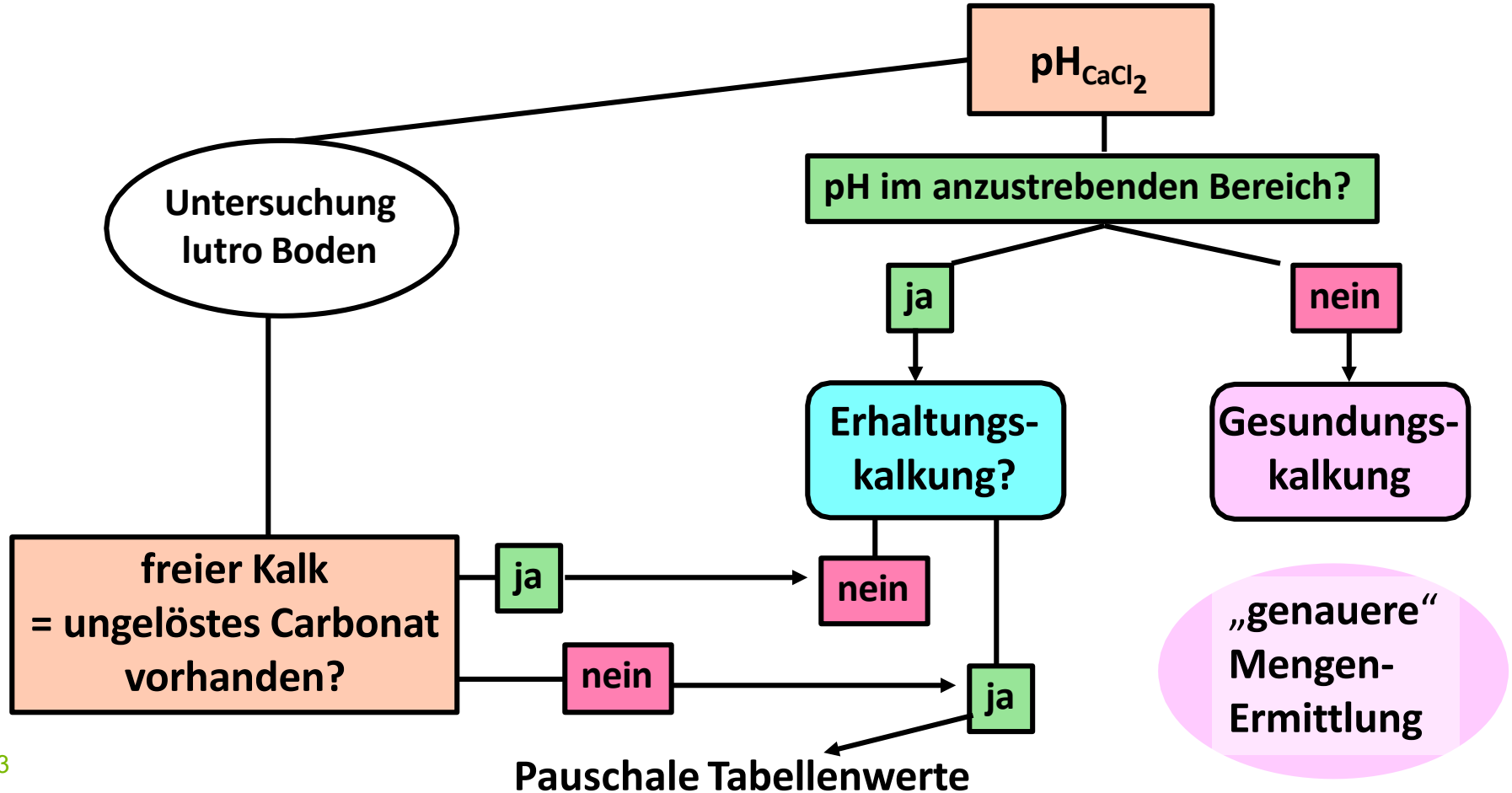
(-) kein freier Kalk (nach Salzsäure-Test): Erhaltungskalkung erforderlich

(+) 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 ( $C_{org} \times 1,72$ )

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







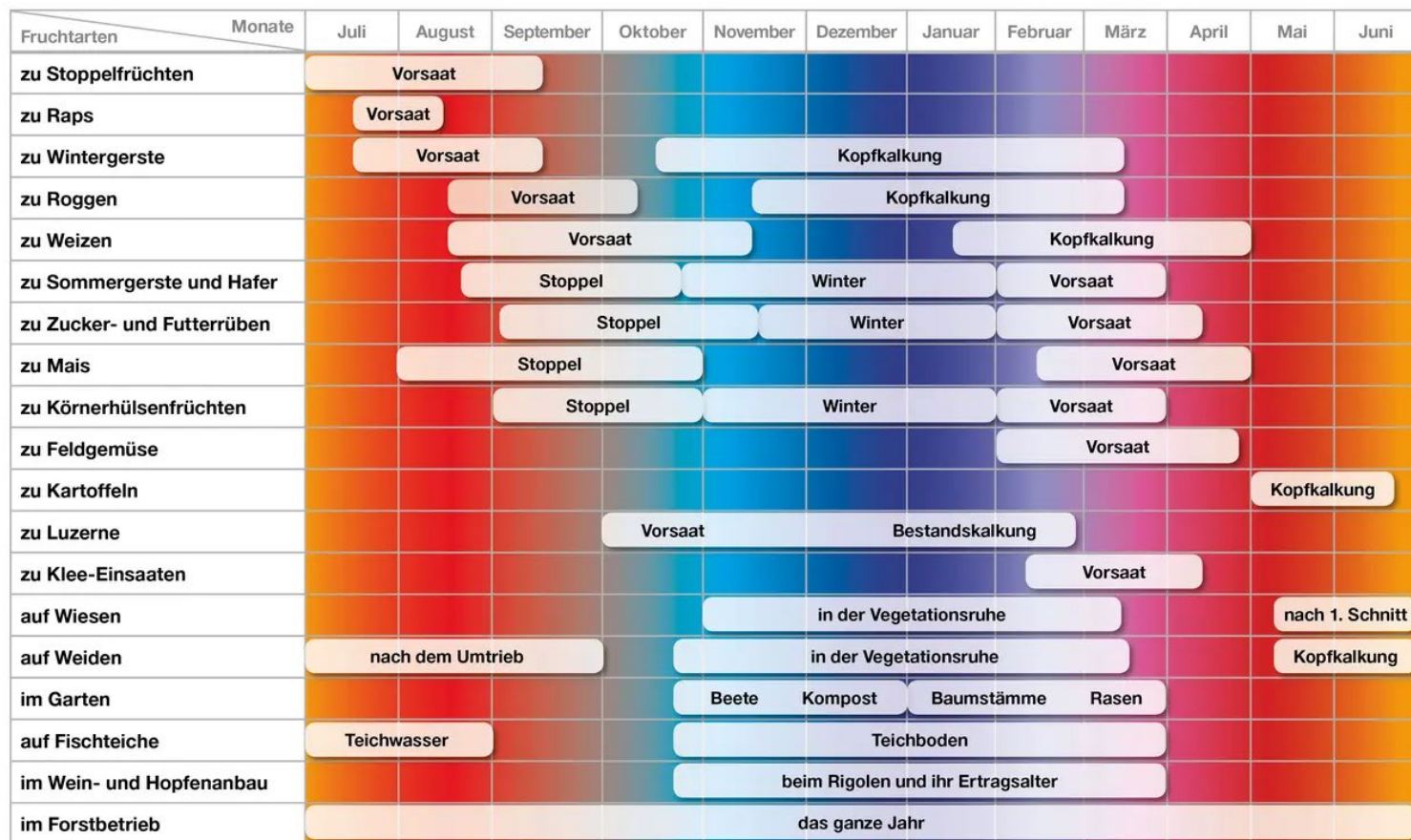
mit 10 %iger Salzsäure

# Kalkdüngemittel

Düngemittel	Kalkform	Kalkgehalt berechnet als CaO %	Nebenbestandteile	Wirkung
Kohlensaurer Kalk	$\text{CaCO}_3$	42–53	$\text{MgCO}_3$	langsam
Kohlensaurer Mg-Kalk	$\text{CaCO}_3 + \text{MgCO}_3$	42–53	z. T. mit $\text{P}_2\text{O}_5$	langsam
Brannkalk	$\text{CaO}$	65–95		rasch
Magnesium-Brannkalk	$\text{CaO} + \text{MgO}$	65–95		rasch
Löschkalk	$\text{Ca}(\text{OH})_2$	60–70		rasch
Mischkalk	$\text{CaO} + \text{CaCO}_3$	60–65		rasch und langsam
Hüttenkalk	$\text{Ca}_2\text{SiO}_4$	40–50	$\text{MgO}$ , Spuren- nährstoffe, z. T. $\text{P}_2\text{O}_5$	langsam
Konverterkalk	$\text{CaO} + \text{Ca}_2\text{SiO}_4$	35–50	z. T. $\text{P}_2\text{O}_5$ z. T. $\text{MgO}$ , Spuren- nährstoffe	rasch und langsam
Rückstandkalk	$\text{CaCO}_3$ , $\text{CaO}$	> 30	z. T. N, $\text{P}_2\text{O}_5$ , $\text{MgO}$	meist langsam
Carbokalk	$\text{CaCO}_3$	> 25	N, $\text{P}_2\text{O}_5$ , $\text{MgO}$	langsam



# Günstige Zeiträume für Kalkdüngung



# Kalkzehrung verschiedener Stickstoffdüngemittel

Kategorie	Produkt	Kalkzehrung je 100 kg N / P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> / K <sub>2</sub> 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
	Kalkammonsalpeter mit MgO	-48
Phosphat/ NP-Dünger	Diammoniumphosphat (DAP)	-210

# Magnesium

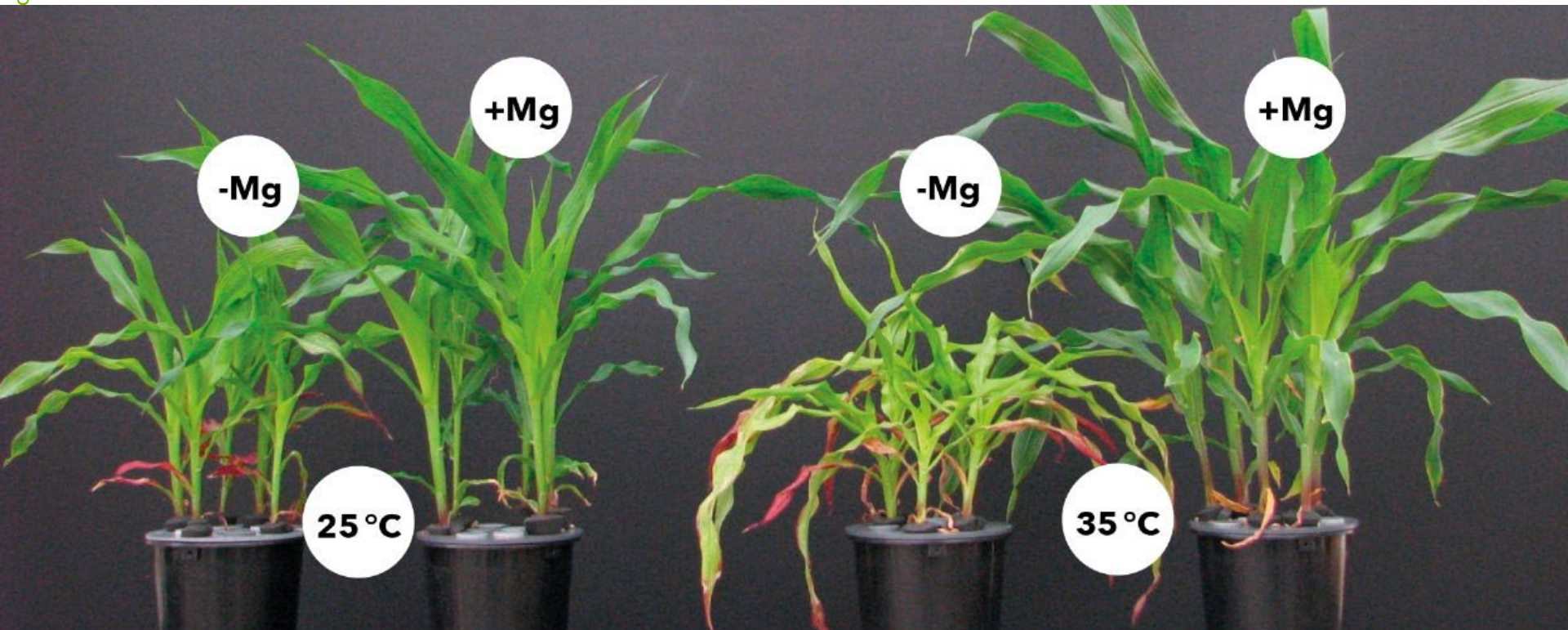


# Mg- Funktionen

- 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





# Magnesiumdüngempfehlung

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

*Tabelle 14: Gehaltsklassen für  $\text{CaCl}_2$ -lösliches Magnesium und Bemessung der Mg-Düngung bei Acker und Dauergrünland*

Gehaltsklasse	Mg-Gehalte (mg/100 g Boden)		Mg-Düngung kg MgO/ha
	(S, I'S)	(IS - T)	
A	< 3	< 5	Abfuhr + 30
B	3 - 6	5 - 9	Abfuhr + 30
C	<b>7 - 10</b>	<b>10 - 20</b>	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 <sub>2</sub> O, 17% S als Sulfat
Stickstoffmagnesia	7	Magnesiumsulfat, Magnesiumcarbonat	20% N (7–10% Nitrat, 10–13% Ammonium)
Magnesia-Kainit	5	Magnesiumsulfat	11% K <sub>2</sub> O, 20% Na
PK-Dünger mit Magnesium	3–10	Magnesiumsulfat, Magnesiumphosphat	
Hüttenkalk	7	Magnesiumsilikat	47% CaO
Korn-Kali	6	Magnesiumsulfat	40% K <sub>2</sub> O
NPK- Dünger mit MgO	2–4	Magnesiumsulfat, Magnesiumcarbonat	
Thomasphosphat	2	Magnesiumphosphat, Magnesiumsilikat	15% P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
Thomaskali	3–6	Magnesiumphosphat	8–12% P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , 11–20% K <sub>2</sub> O

# Schwefel

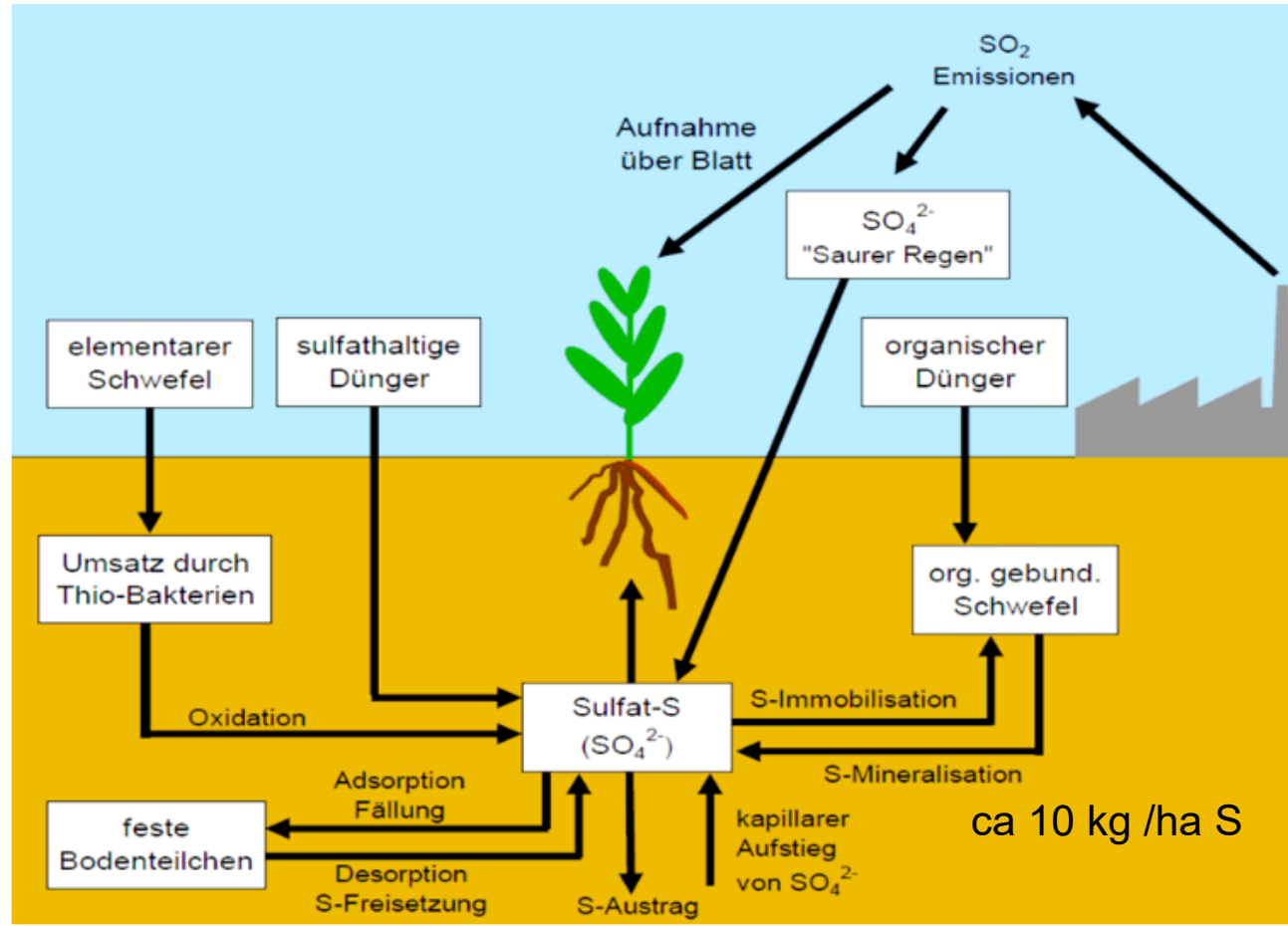
# Schwefel – Funktionen in der Pflanze

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



# Schwefelkreislauf

- aus dem Boden:  
Sulfat  $\text{SO}_4^{2-}$
- Übers Blatt – bzw.  
aus der Luft
  - $\text{SO}_2$
  - $\text{H}_2\text{S}$
  - $\text{SO}_4^{2-}$



# Schwefelmangel





# Kalkzehrung verschiedener Stickstoffdüngemittel

Schwefel- bedarf	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	Schwefeldüngebedarf 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  $\text{SO}_4$  -S
- hohe zeitliche Variabilität des  $\text{SO}_4$  -S

**Beispiele für schwefelhaltige N-Dünger**

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

Dünger	Gewichts-% (kg/dt) <sup>1</sup>		Volumen-% (kg/100 l) <sup>1</sup>		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

<sup>1</sup> 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**