



# Bodenkultur und Düngung

Kationenaustauschkapazität, Basensättigung, pH-Wert und  
Edaphon

Prof. Dr. Mareike Ließ

WS 25/26

## Rückblick: Aufgabe

Sie haben den Pflughorizont (Ap) beprobt. Sie haben gestörte Proben und ungestörte Proben entnommen. Die benutzten Stechzylinder haben ein Volumen von  $100 \text{ cm}^3$ . Der Ap-Horizont hat eine Mächtigkeit von 23 cm. Im Labor haben Sie einen  $C_{\text{org}}$ -Gehalt von 1,8 % ( $18 \text{ g kg}^{-3}$ ), und eine Lagerungsdichte von  $1,6 \text{ g cm}^{-3}$  bestimmt.

- 1) Bitte berechnen Sie den  $C_{\text{org}}$ -Vorrat des Pflughorizontes in  $\text{kg m}^{-2}$  [ $\text{t ha}^{-1}$ ]
- 2) Bitte korrigieren Sie den berechneten  $C_{\text{org}}$ -Vorrat um den Skelettgehalt: Die Masse ( $m_{\text{Skelett}}$ ) beträgt 5,3 g. Das Volumen ( $V_{\text{Skelett}}$ ) beträgt  $2 \text{ cm}^3$ .

# Lösung

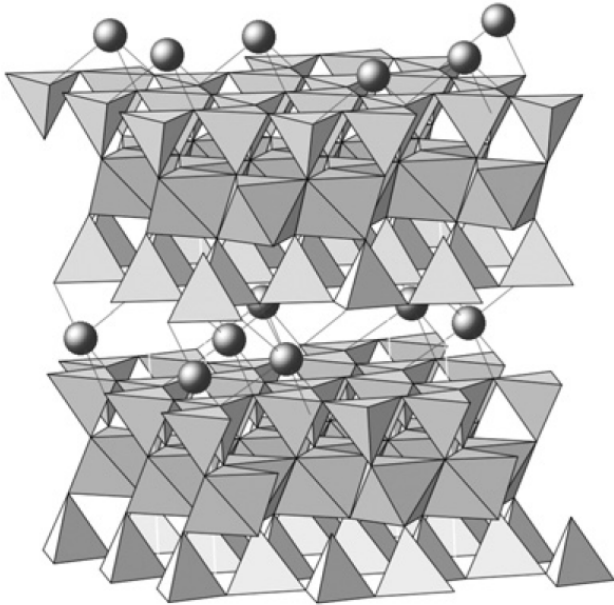
1) Der Pflughorizont hat einen C<sub>org</sub>-Vorrat von 6,62 kg m<sup>-2</sup> bzw. 66,24 t ha<sup>-1</sup>.

$$\text{Vorrat}_{\text{C}_{\text{org}}} = 18 \text{ g kg}^{-1} \cdot 1600 \text{ kg m}^{-3} \cdot 0,23 \text{ m} \cdot \frac{1}{1000} = 6,62 \text{ kg m}^{-2}$$

2) Der Pflughorizont hat einen C<sub>org</sub>-Vorrat von 6,40 kg m<sup>-2</sup> bzw. 64,05 t ha<sup>-1</sup>.

$$\text{Vorrat}_{\text{C}_{\text{org}}} = 18 \text{ g kg}^{-1} \cdot \left( \frac{0,16 \text{ kg} - 0,0053 \text{ kg}}{0,0001 \text{ m}^3 - 0,000002 \text{ m}^3} \right) \cdot (1 - 0,02) \cdot 0,23 \text{ m} \cdot \frac{1}{1000} = 6,40 \text{ kg m}^{-2}$$

# Rückblick: Tonminerale

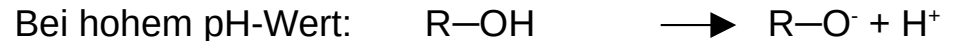


**Abb. 2.2-10** Polyedermmodell eines Smectits. Die (nicht maßstabgerechten) Kugeln zwischen den Silicatschichten sind die austauschbaren Kationen.

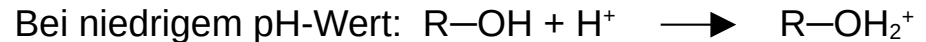
Amelung et al., 2018

Tonminerale tragen **permanente negative Ladung**, die durch isomorphen Ersatz in der Kristallstruktur zustande kommt. Diese Ladung ist pH-unabhängig.

Zusätzlich haben sie eine **variable Ladung**, die von der sauren oder basischen Umgebung abhängt. Diese entsteht an den Bruchflächen und Seitenkanten der Minerale durch die Protonierung oder Deprotonierung von Hydroxylgruppen, wodurch je nach pH-Wert **sowohl positive als auch negative Ladungen** entstehen können:

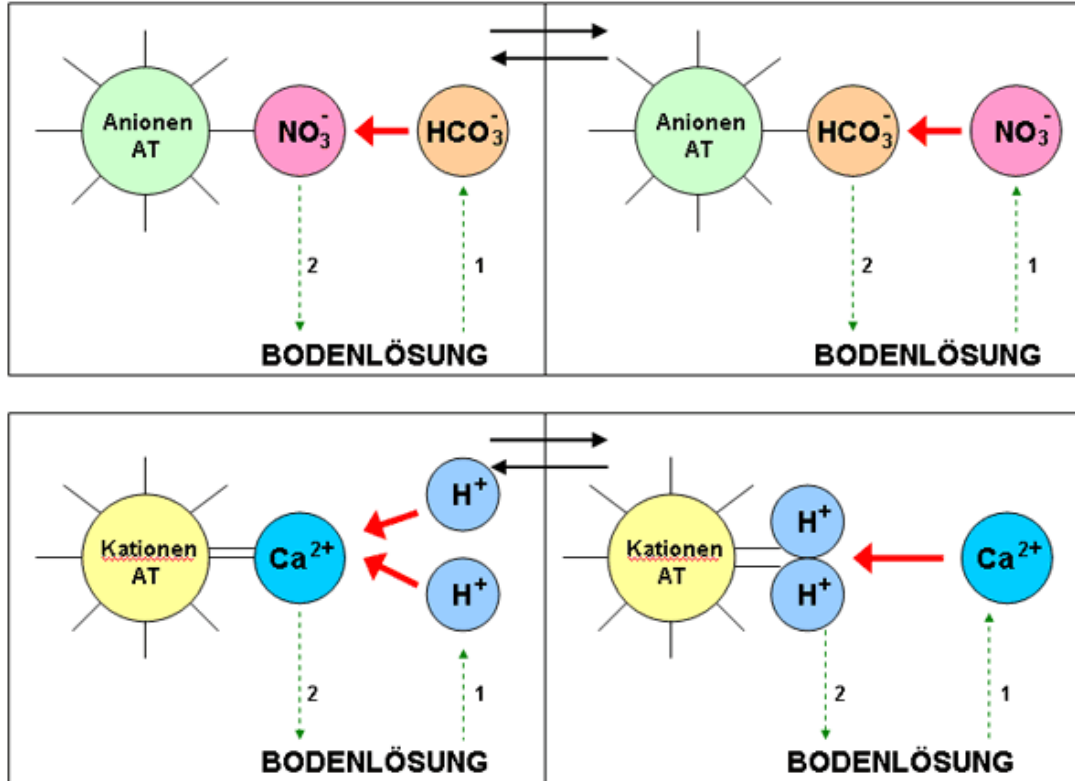


Es entsteht negative Ladung



Es entsteht positive Ladung

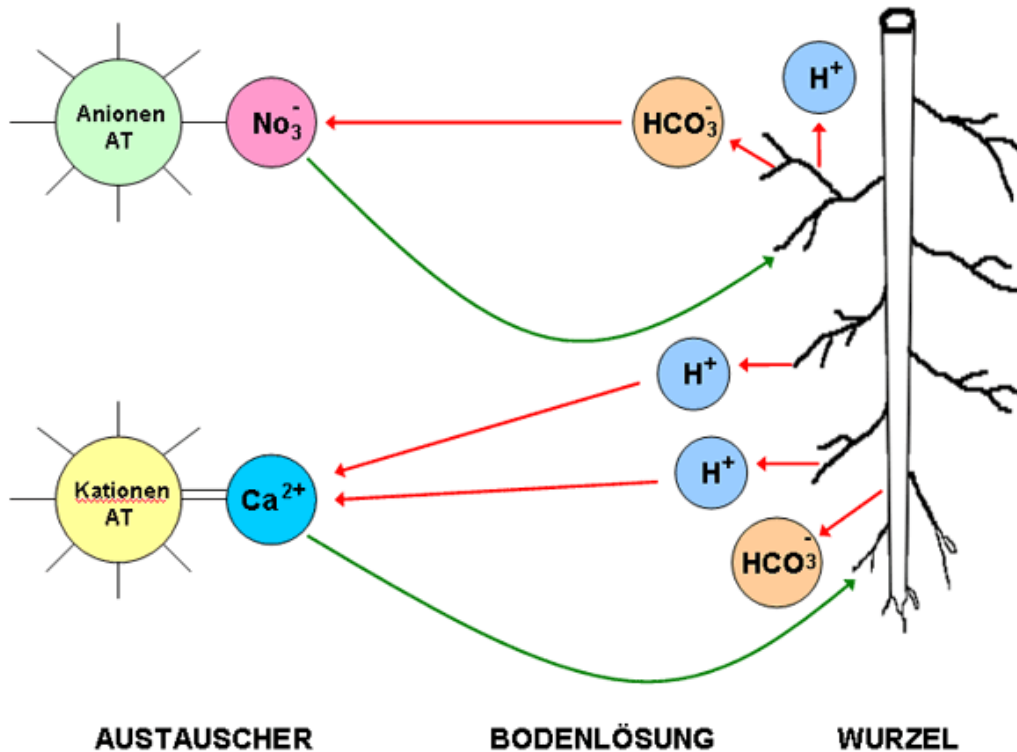
# Ionenaustauschreaktionen



- Zwischen fester und flüssiger Phase
- Kationen- und Anionenaustauscher
- i.d.R. dominieren im Boden die Kationen-Austauscher
- Nährstoffhaushalt des Bodens
- Bodenreaktion

<https://www.hypersoil.uni-muenster.de>

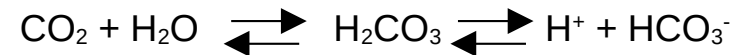
# Nährstoffversorgung von Kulturpflanzen



Die Funktion des Bodens als Ionenaustauscher ist eine wesentliche Voraussetzung für die Versorgung der Pflanzen mit Nährstoffen:

- Am Austauscher adsorbierte Nährstoffe bleiben für die Pflanzen leicht verfügbar,
- Die Auswaschung aus dem Wurzelraum wird verhindert.
- Durch Ionenabgabe der Pflanzenwurzeln werden Nährstoffe über die Bodenlösung eingetauscht

Zellatmung:



<https://www.hypersoil.uni-muenster.de>

# Kationenaustauschkapazität (KAK)

## effektive Kationenaustauschkapazität

( $KAK_{\text{eff}}$ , in  $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ ):

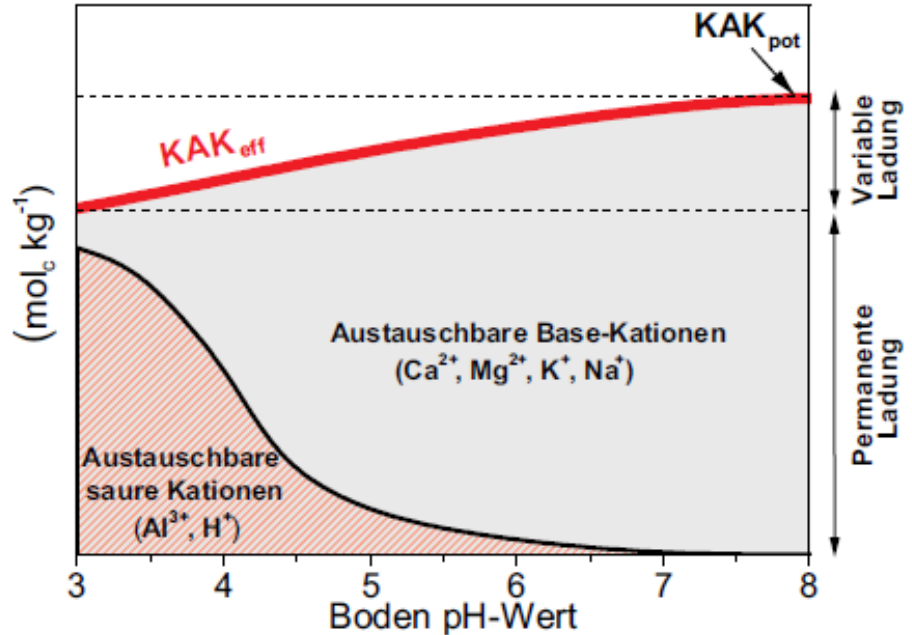
- Summe an permanenter und variabler negativer Ladungen eines Bodens.
- Sie wird aus der Summe der Ladungen aller austauschbaren Hauptkationen ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{H}^+$ ) beim aktuellen pH-Wert des Bodens bestimmt.

## potentielle Kationenaustauschkapazität

( $KAK_{\text{pot}}$ , in  $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ ):

- KAK eines Bodens in einer gepufferten Lösung bei pH 7 bis pH 8

=> Aus der  $KAK_{\text{pot}}$  lässt sich ableiten, auf welchen Wert die  $KAK_{\text{eff}}$  eines sauren Bodens durch eine Aufkalkung maximal erhöht werden kann.

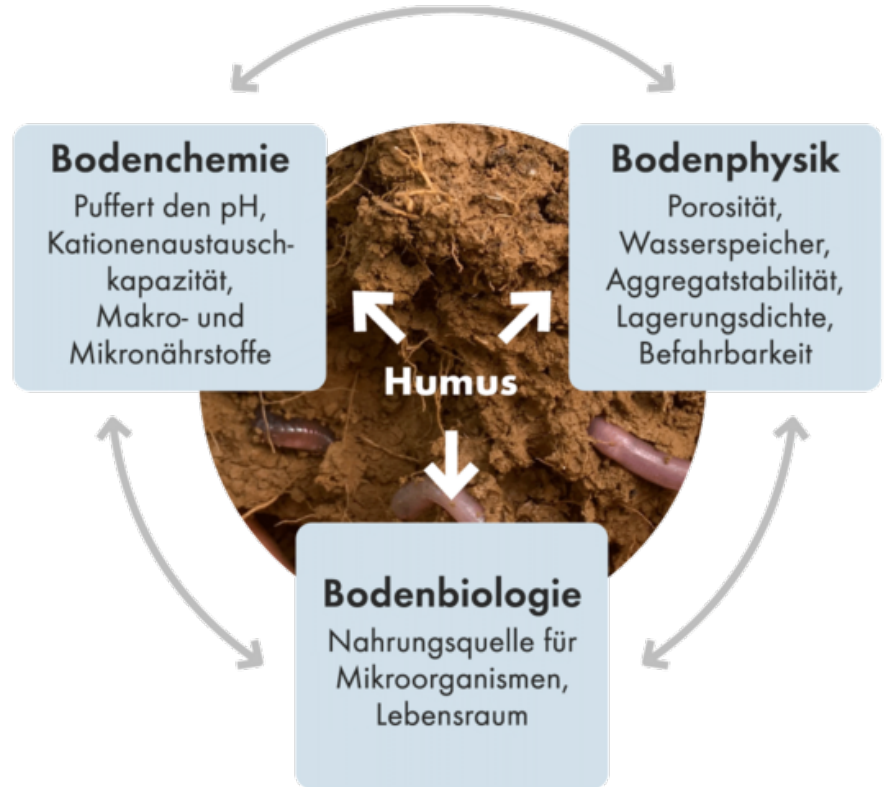


Amelung et al., 2018

# Rückblick: organische Substanz

Die KAK von Böden ist stark vom Ton- und Humusgehalt abhängig.

Die organische Substanz trägt pro kg Humus zwischen 60 und 300 cmol zur  $KAK_{pot}$  bei, je nach dem, wie hoch der Huminstoffanteil im Humus ist.



<https://www.bioaktuell.ch>



# Basensättigung

**Basensättigung (BS):** prozentualer Anteil der  $KAK_{eff}$ , der mit basischen Kationen ( $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $K^+$  und  $Na^+$ ) besetzt ist.

$$BS_{eff}(\%) = \frac{2q_{Ca} + 2q_{Mg} + q_K + q_{Na}}{KAK_{eff}} \cdot 100$$

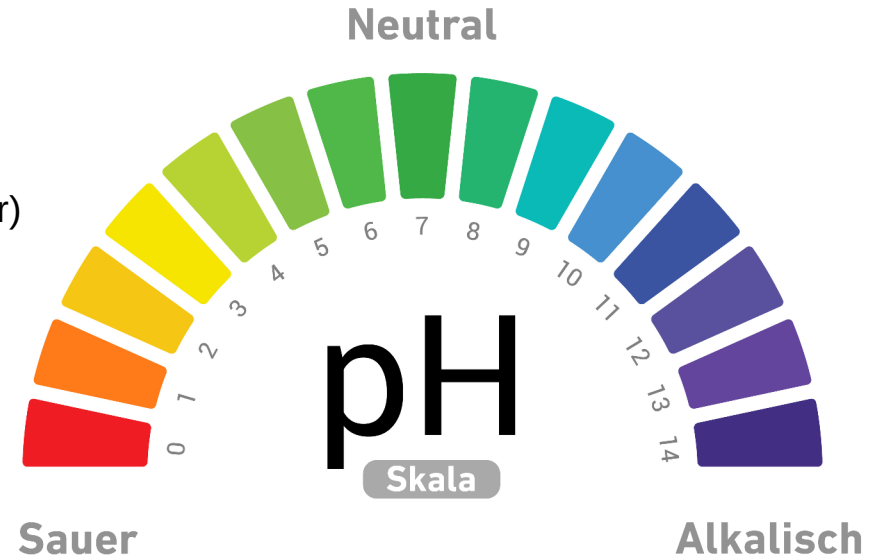
$q_i$  austauschbar adsorbierte Konzentration des Kations  $i$  (in  $mmol\ kg^{-1}$ )

# Bodenreaktion

Boden-pH-Wert: pH-Wert ( $\text{pH} = -\log\{\text{H}^+\}$ ), der sich in einer wässrigen Lösung einstellt, welche mit dem Boden ins Gleichgewicht gebracht wurde.

Die pH-Werte der meisten natürlichen Böden liegen im Bereich zwischen pH 3 und 10.

**Messung:** 10 g Boden werden mit 25 ml einer 0,01 M  $\text{CaCl}_2$ -Lösung (oder deionisiertes Wasser) versetzt, für mindestens 30 min geschüttelt. Anschließend wird der pH-Wert mit einer Elektrode gemessen.



# Rückblick: Pedogenese

**Die Versauerung von Böden im Laufe der Pedogenese unter humiden Klimabedingungen ist ein natürlicher Prozess:**

- 1) pro Zeiteinheit werden mehr Protonen durch Niederschläge oder bodeninterne Prozesse eingetragen bzw. freigesetzt, als die Böden neutralisieren können, und
- 2) die löslichen Produkte aller chemischen Reaktionen, bei denen Protonen verbraucht werden, werden mit dem Sickerwasser ausgewaschen. Die Puffersysteme der Böden werden zunehmend (und größtenteils irreversibel) erschöpft, die Säureneutralisationskapazität (SNK) des Bodens nimmt ab.

# Einfluss des Boden-pH auf den $C_{org}$ -Vorrat

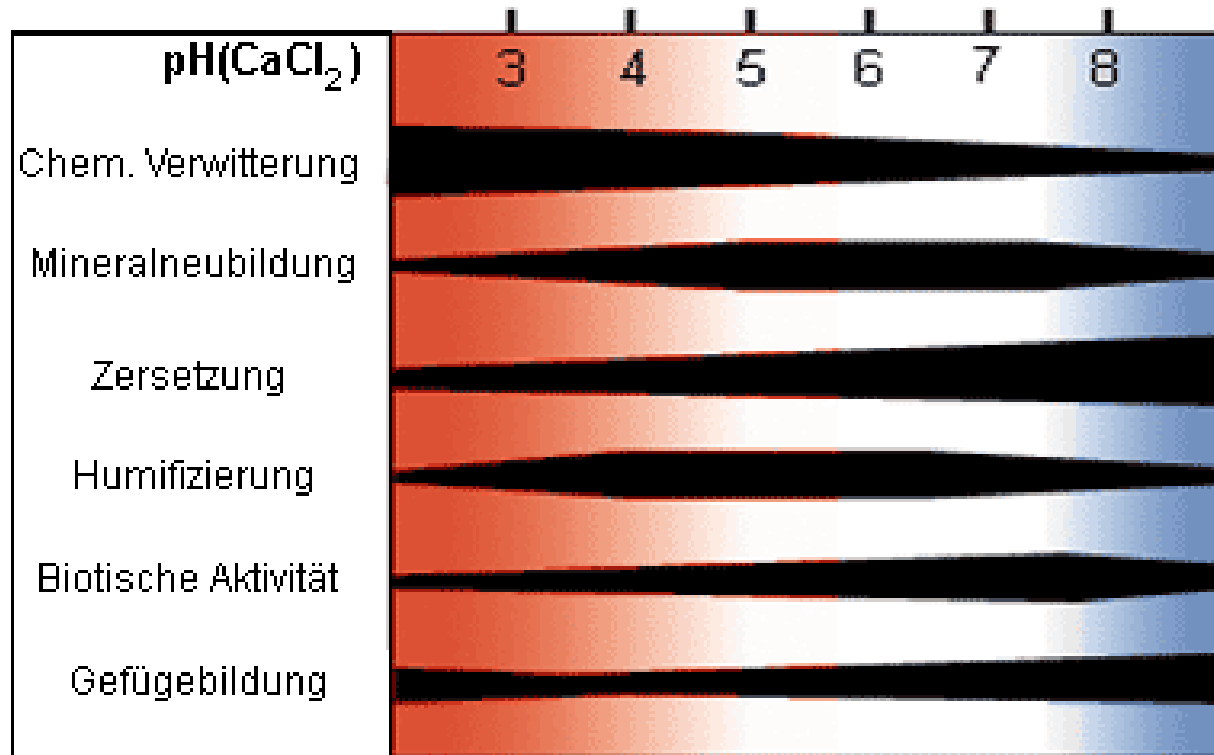
**Verringerung des  $C_{org}$ -Vorrats:** Durch die Erhöhung des pH-Wertes kommt es zu einer erhöhten mikrobiellen Aktivität und einer damit einhergehenden möglichen Abnahme des  $C_{org}$ -Vorrats kommen.

**Anstieg des  $C_{org}$ -Vorrats:** durch Kalkungsmaßnahmen kann die Pflanzenproduktivität zunehmen, was den  $C_{org}$ -Eintrag in den Boden steigert. Zudem verbessert Kalk die Bodenstruktur, was die  $C_{org}$ -Mineralisationsrate verringern kann.

**=> Der pH-Wert beeinflusst biologische, chemische und physikalische Bodeneigenschaften**

# Auswirkung der Bodenreaktion auf Bodenprozesse

sauer < Optimalbereich > alkalisch



<https://www.hypersoil.uni-muenster.de>

# Nährstoffverfügbarkeit in Abhängigkeit vom Boden-pH



<https://www.compo.de>

# Optimaler pH-Bereich für Ackerböden

| Bodenartengruppe/vorwiegende Bodenart          |                          | Humusgehalt des Bodens (%)                  |                   |                   |                  |           |
|--|--------------------------|---|-------------------|-------------------|------------------|-----------|
|  |                          | ≤ 4   | 4,1 bis 8,0       | 8,1 bis 15,0      | 15,1 bis 30      | > 30      |
|  |                          | pH-Werte der Klasse C und Erhaltungskalkung |                   |                   |                  |           |
| 1/Sand   | pH-Klasse C<br>dt CaO/ha | 5,4 bis 5,8<br>6                            | 5,0 bis 5,4<br>5  | 4,7 bis 5,1<br>4  | 4,3 bis 4,7<br>3 |           |
| 2/schwach lehmiger Sand                        | pH-Klasse C<br>dt CaO/ha | 5,8 bis 6,3<br>10                           | 5,4 bis 5,9<br>9  | 5,0 bis 5,5<br>8  | 4,6 bis 5,1<br>4 |           |
| 3/stark lehmiger Sand                          | pH-Klasse C<br>dt CaO/ha | 6,1 bis 6,7<br>14                           | 5,6 bis 6,2<br>12 | 5,2 bis 5,8<br>10 | 4,8 bis 5,4<br>5 |           |
| 4/sandiger/schluffiger Lehm                    | pH-Klasse C<br>dt CaO/ha | 6,3 bis 7,0 <sup>1)</sup><br>17             | 5,8 bis 6,5<br>15 | 5,4 bis 6,1<br>13 | 5,0 bis 5,7<br>6 |           |
| 5/toniger Lehm bis Ton                         | pH-Klasse C<br>dt CaO/ha | 6,4 bis 7,2 <sup>1)</sup><br>20             | 5,9 bis 6,7<br>18 | 5,5 bis 6,3<br>16 | 5,1 bis 5,9<br>7 |           |
| 6/Hochmoor und saures Niedermoor <sup>2)</sup> | pH-Klasse C<br>dt CaO/ha |   |                   |                   |                  | 4,3<br>3) |

Rahmenschema zur Einstufung der pH-Werte des Bodens (CaCl<sub>2</sub>- Methode) in pH-Klasse C (anzustrebender/optimaler pH-Bereich) sowie Erhaltungskalkung (dt CaO ha<sup>-1</sup>).

- Der anzustrebende pH-Wert nimmt mit ansteigendem Tongehalt zu und mit zunehmendem Humusgehalt ab.
- für Böden unter Dauergrünlandnutzung ist der optimale pH-Wert geringer als bei Ackernutzung.

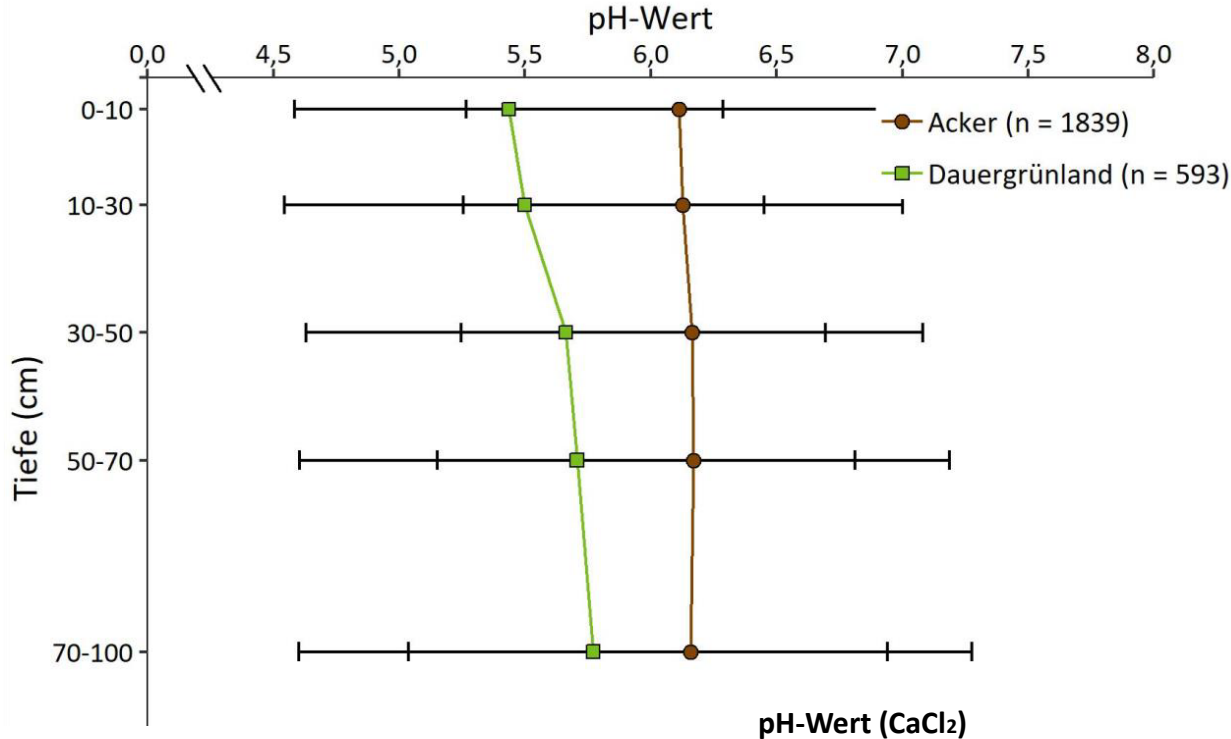
<sup>1)</sup> auf karbonathaltigen Böden (freier Kalk): keine Erhaltungskalkung

<sup>2)</sup> Auf einem Großteil der Niedermoore sind die pH-Werte geogen bedingt > 6,5

<sup>3)</sup> keine Erhaltungskalkung

VDLUFA, 2000. Bestimmung des Kalkbedarfs von Acker- und Grünlandböden. Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten. Darmstadt, VDLUFA Selbstverlag.

# Boden-pH auf landwirtschaftlich genutzten Böden



Von den Beprobungspunkten der BZE-LW lagen....

- 42 % der mineralischen Böden unter Acker- und
- 57 % der Böden unter Dauergrünlandnutzung

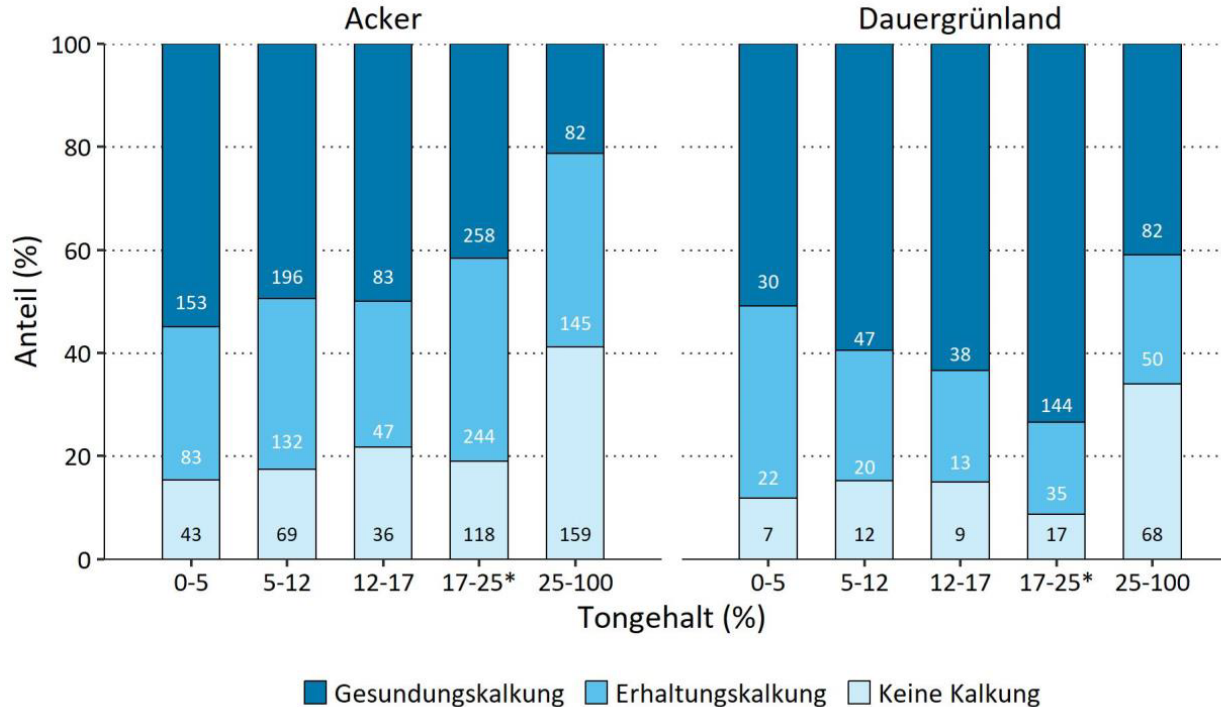
unterhalb des pH-Wert-Optimums.

Bei 23 % der Böden unter Acker- bzw. bei 19 % unter Dauergrünlandnutzung lag der pH-Wert über den als optimal empfohlenen Wertebereichen.

Jacobs A, Flessa H, Don A et al (2018) Landwirtschaftlich genutzte Böden in Deutschland - Ergebnisse der Bodenzustandserhebung. Braunschweig: Johann Heinrich von Thünen-Institut, Thünen Rep 64, DOI:10.3220/REP1542818391000



# Kalkdüngungsbedarf



Anteil der Beprobungspunkte mit Kalkdüngungsbedarf unter Acker- und Dauergrünlandnutzung aus der BZE-LW in den für die Beurteilung des pH-Wertes (CaCl<sub>2</sub>) im Oberboden (0-30 cm) relevanten Bodentexturgruppen nach VDLUFA. Zahlen kennzeichnen den Stichprobenumfang.

Jacobs A, Flessa H, Don A et al (2018) Landwirtschaftlich genutzte Böden in Deutschland - Ergebnisse der Bodenzustandserhebung. Braunschweig: Johann Heinrich von Thünen-Institut, Thünen Rep 64, DOI:10.3220/REP1542818391000

# Chemische Kennwerte in ausgewählten Oberböden

|   | pH                   | C <sub>org</sub> | KAK <sub>pot</sub>                 | KAK <sub>eff</sub> | Sättigung (% von KAK <sub>eff</sub> ) |    |    |     |     |
|---|----------------------|------------------|------------------------------------|--------------------|---------------------------------------|----|----|-----|-----|
|   | (CaCl <sub>2</sub> ) | (%)              | cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> |                    | Al                                    | Ca | Mg | K   | Na  |
| <i>Böden unter Acker (Mitteleuropa)</i> |                      |                  |                                    |                    |                                       |    |    |     |     |
| Parabraunerde (Löss, Straubing)         | 6,3                  | 1,4              | 17                                 | 14                 | 0                                     | 80 | 15 | 5   | < 1 |
| Schwarzerde (Löss, Hildesheim)          | 7,2                  | 1,6              | 18                                 | 18                 | 0                                     | 90 | 9  | < 1 | < 1 |
| Podsol (Sand, Celle)                    | 5,2                  | 2,5              | 12                                 | 3                  | 0                                     | 86 | 6  | 7   | 1   |
| Pelosol (Liaston, Franken)              | 6,7                  | 2,4              | 22                                 | 17                 | 0                                     | 83 | 8  | 9   | 0   |
| Kleimarsch (Wesermarsch)                | 5,1                  | 2,7              | 37                                 | 25                 | 0                                     | 50 | 42 | 3   | 5   |
| <i>Böden unter Wald (Mitteleuropa)</i>  |                      |                  |                                    |                    |                                       |    |    |     |     |
| Podsol (Granit, Bayerischer Wald)       | 2,6                  | 11,7             | –                                  | 7                  | 65                                    | 22 | 6  | 5   | 2   |
| Pseudogley (Löss, Bonn)                 | 3,6                  | 4,9              | 15                                 | 7                  | 79                                    | 16 | 3  | 2   | 0   |
| Braunerde (Löss/Bims, Vogelsberg)       | 2,9                  | 19,8             | 60                                 | 12                 | 85                                    | 6  | 4  | 5   | 0   |
| <i>Böden anderer Klimate</i>            |                      |                  |                                    |                    |                                       |    |    |     |     |
| Vertisol (Sudan)                        | 6,8                  | 0,9              | 47                                 | 47                 | 0                                     | 71 | 25 | < 1 | 4   |
| Andosol (Hawaii)                        | 4,5                  | 11,7             | 53                                 | 13                 | 4                                     | 71 | 20 | 4   | 2   |
| Ferralsol (Brasilien)                   | 3,5                  | 2,8              | 13                                 | 3                  | 89                                    | 3  | 4  | 3   | 1   |
| Acrisol (Puerto Rico)                   | 3,5                  | 3,3              | 26                                 | 7                  | 72                                    | 15 | 8  | 3   | 2   |
| Solonchak (Arizona, USA)                | 9,9                  | 0,4              | 36                                 | –                  | 0                                     | 45 | 6  | 3   | 47  |

Amelung et al., 2018

# Bodenleben in Zahlen

In einer Hand voll Boden gibt es mehr Lebewesen als Menschen auf der Erde. In der oberen Bodenschicht eines fruchtbaren Bodens leben pro m<sup>2</sup> eine Billiarde Bakterien.

Erst ein Prozent der im Boden lebenden Arten erfasst.

Die Biomasse aller Bodenorganismen macht bei landwirtschaftlich genutzten Böden im Durchschnitt etwa fünf Prozent der organischen Substanz aus.

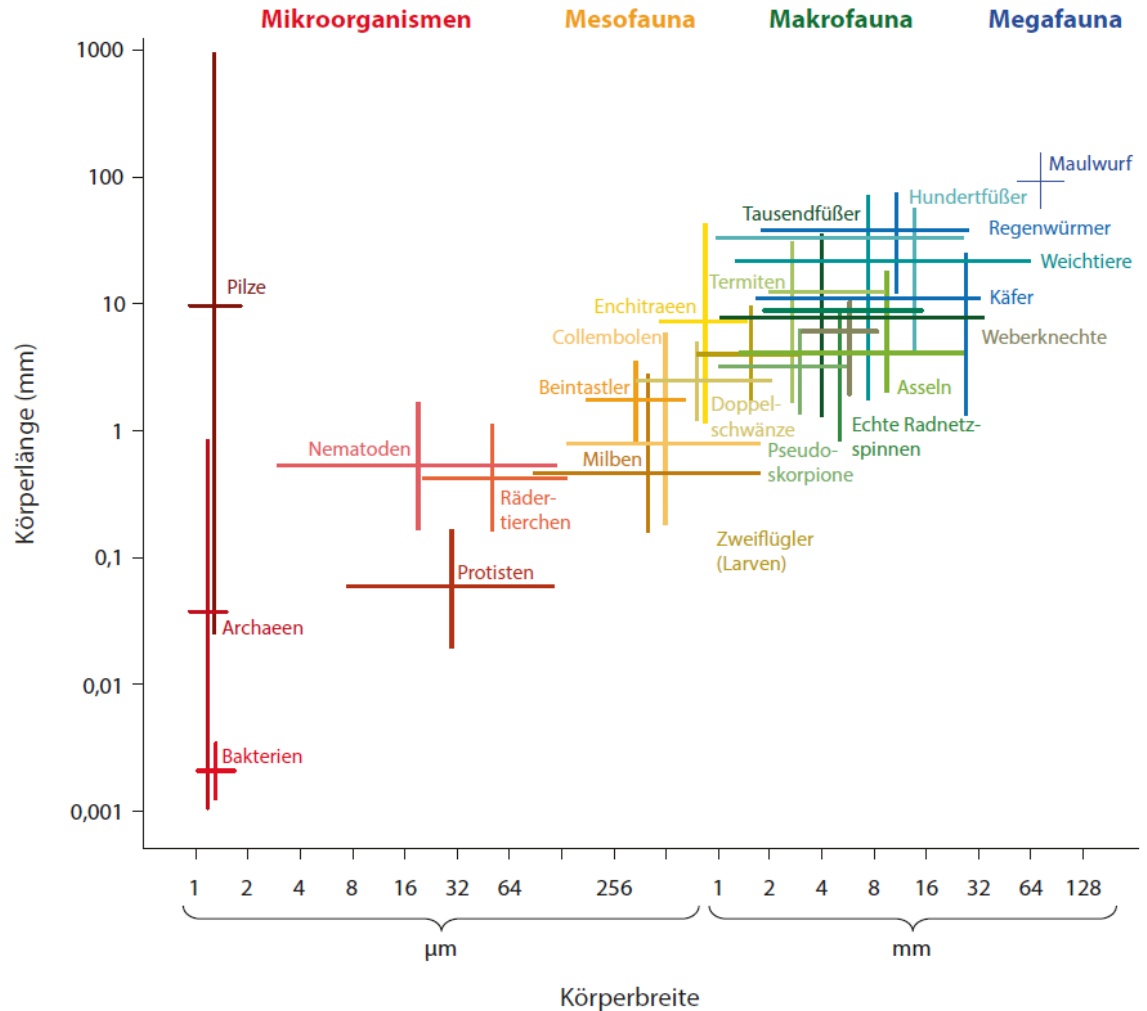
Das Gesamtgewicht des Bodenlebens pro Quadratmeter und 30 cm Tiefe beträgt auf Grünlandböden demnach etwa 1 kg.

=> 20 Großvieheinheiten pro Hektar.



# Edaphon

Die Gesamtheit der im Boden lebenden Organismen wird als Edaphon bezeichnet. Die Einteilung des Edaphons in Bakterien, Pilze, Viren, Algen, Mikrofauna, Mesofauna und Makrofauna erfolgt anhand des Körperdurchmessers der Organismen.



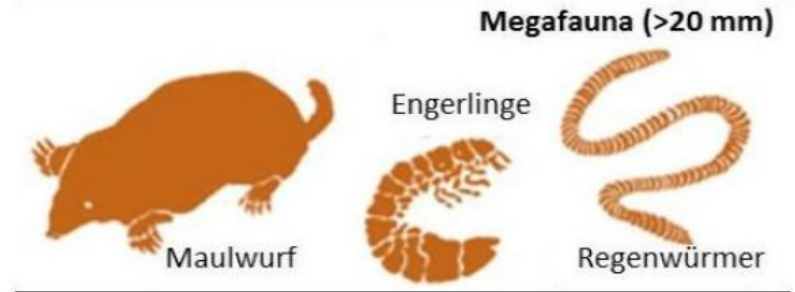
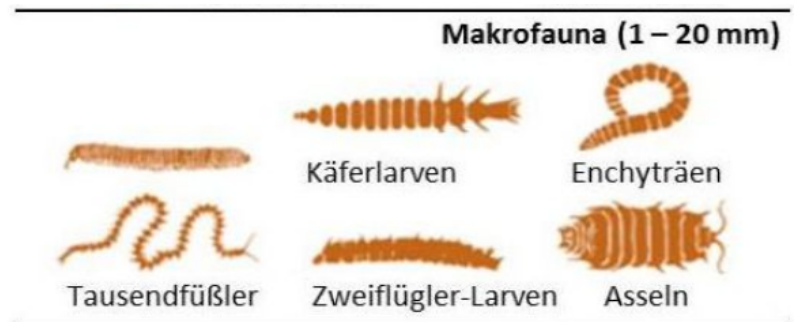
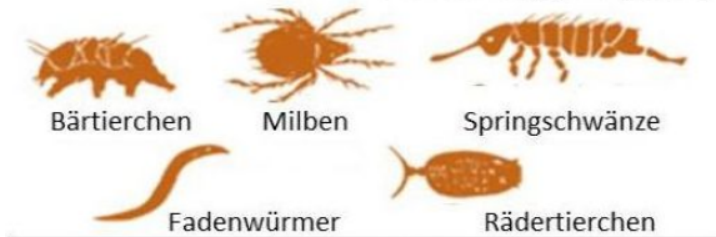
# Ausgewählte Bodenorganismen



**Mikrofauna (0,002 – 0,2 mm)**

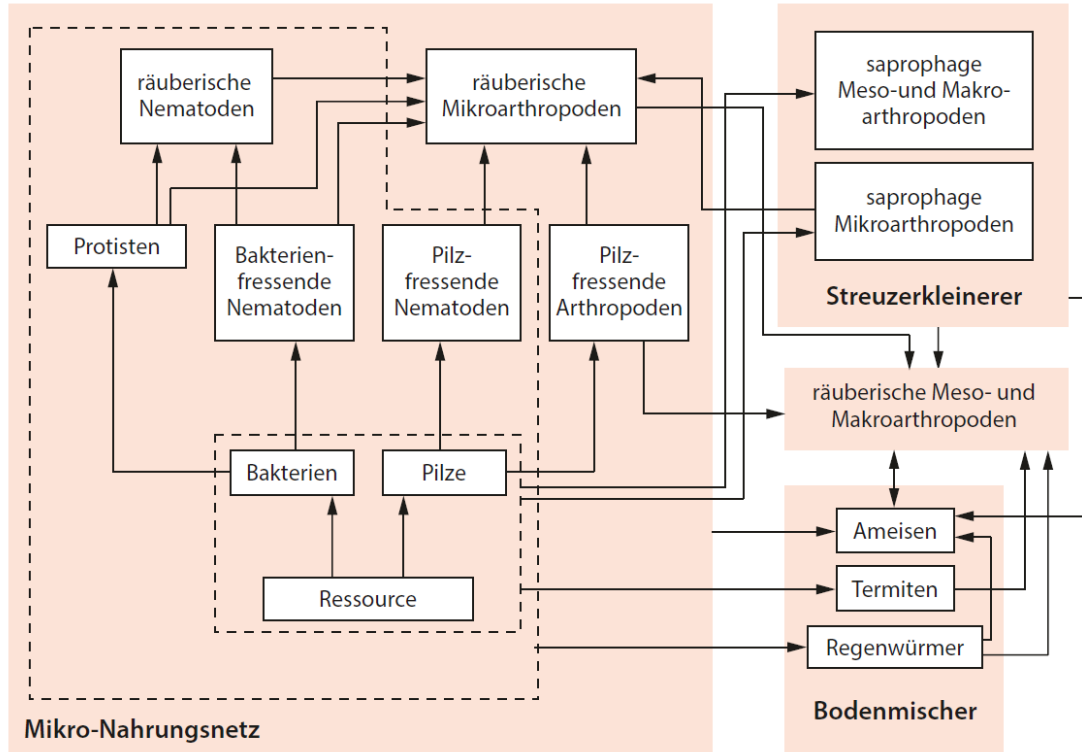


**Mesofauna (0,2 – 2,0 mm)**



<https://www.agrarraum.info/lexikon/bodenlebewesen>

# Edaphon: Nahrungsnetz



Organisation des Nahrungsnetzes in drei Kategorien: Bodenmischer, Streuzerkleinerer und Mikronahrungsnetz.

Amelung et al., 2018

# Funktionen des Edaphons

- Zerkleinerung, Zersetzung und Umsetzung organischer Substanz und dadurch Bereitstellung von Nährstoffen.
- Beitrag zum Bodenwasserhaushalt
- Gefügebildung, Erzeugen und Unterhalten der Bodenstruktur und Belüftung des Bodens durch die mechanische Bearbeitung der oberen Bodenschicht
- Fressen mikrobischer Schadorganismen
- Abbau von Schadstoffen
- Erhöht die Resistenz von Kulturpflanzen gegen Trockenstress

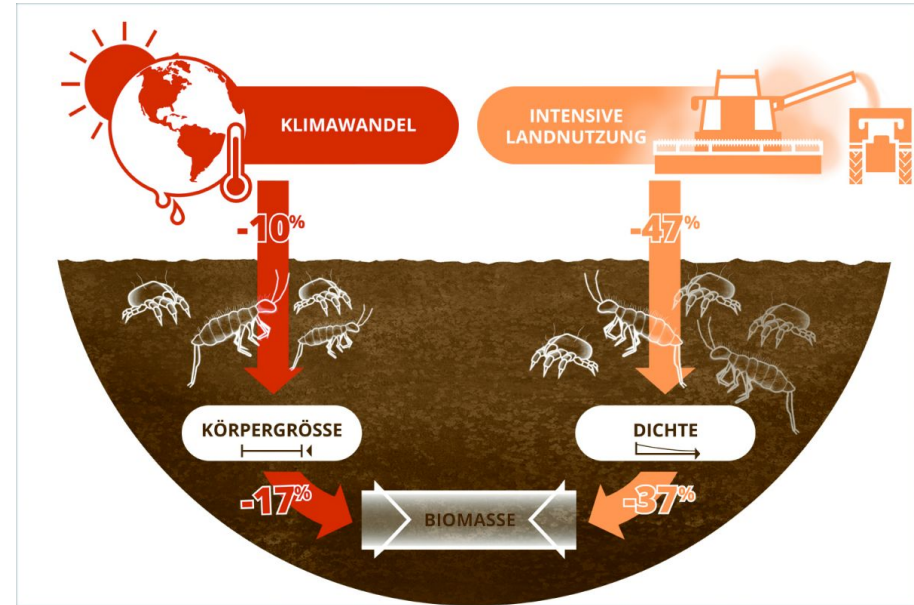
# Einfluss der Landwirtschaft und des Klimawandels

## Intensive Landnutzung reduziert die Häufigkeit:

- Mineraldünger, synthetische Pflanzenschutzmittel und weitere Stoffeinträge akkumulieren sich im Boden und schädigen die dort lebenden und wirkenden Organismen.
- Der Einsatz von immer intensiverer und schwererer Landtechnik verdichtet und verändert das Bodengefüge in einem Maße, in dem es vielen Bodenlebewesen keinen angemessenen Lebensraum mehr bietet.

## Höhere Temperaturen reduzieren die Körpergröße (Mesofauna):

- eine Beschleunigung von Wachstum und Entwicklung und der erhöhte Metabolismus führen zu einer Reduktion der Körpergröße.



<https://www.pflanzenforschung.de/de/pflanzenwissen/journal/doppelter-stress>



# Lösungsansätze

## Maßnahmen zur Förderung des Bodenlebens

### Integriertes Nährstoffmanagement

- Sicherstellung der Versorgung des Bodenlebens mit ausreichend organischer Substanz
- Präferenzierung organischer vor mineralischer Düngung
- Ausgleich von Nährstoffbilanzen
- Orientierung der Ausbringzeitpunkte an der jeweiligen Kulturpflanze
- Einsatz verlustarmer Ausbringtechnik mit teilweise offenem Zugang zur Besiedelung von organischen Düngemitteln
- Stärkung regionaler Nährstoffkreisläufe durch flächengebundene Tierhaltung
- Anlage von möglichst mehrjährigen Ackerrandstreifen, ohne Einsatz von Dünge- und Pflanzenschutzmitteln
- Ausschluss einer Kontamination durch Düngemittel (Schwermetalle, Antiparasitika, Antibiotika, Krankheitserreger), Einpferchen behandelter Weidetiere, Aufarbeitung belasteter Gülle

<https://www.agrarraum.info/lexikon/bodenlebewesen>

# Lösungsansätze

## Maßnahmen zur Förderung des Bodenlebens

|                                    |   |
|------------------------------------|---|
| <b>Bodenbearbeitung</b>            | <ul style="list-style-type: none"><li>• Einsatz konservierender Bodenbearbeitungsverfahren</li><li>• Entkopplung von Direkt- und Mulchsaatsystemen von der Verwendung breit wirkender Herbizide</li><li>• Verwendung energieeffizienter, leichter und bodenschonender Landtechnik</li></ul>   |
| <b>Integrierter Pflanzenschutz</b> | <ul style="list-style-type: none"><li>• konsequente Einhaltung der Leitlinien des integrierten Pflanzenschutzes und dementsprechend Einsatz synthetischer Pflanzenschutzmittel nur als letztes Mittel der Wahl</li><li>• Förderung natürlicher Nützlinge, auch unter den Bodenorganismen als Bestandteil des Pflanzenschutzes</li><li>• Einsatz von Pflanzenschutzmitteln nur unter Einhaltung ökologischer Schadschwellen</li><li>• Kompensation biodiversitätsschädigender Effekte durch Einrichtung von für den Naturschutz wertvollen Refugialflächen</li><li>• Ausbringung von Pestiziden nur nach Bestandsschluss und entsprechender Witterung, um unnötige Einträge in den Boden zu verringern</li><li>• Einrichten von Ackerrandstreifen, ohne Einsatz von Pflanzenschutz- und Düngemitteln</li></ul> |

# Zusammenfassung

- Kationenaustauschkapazität und Basensättigung
- Bedeutung der KAK für die Nährstoffversorgung
- Bodenreaktion und Auswirkung auf Bodenprozesse
- Optimaler pH-Wert
- Edaphon: Mikroorganismen, Meso-, Makro- und Megafauna
- Funktionen des Edaphons
- Einfluss der Landwirtschaft auf das Edaphon
- Lösungsansätze zur Förderung des Bodenlebens

# Quellen

Amelung, W., Blume, H.-P., Fleige, H. et al. (2018). Scheffer/  
Schachtschabel. Lehrbuch der Bodenkunde. 17. Auflage, Springer  
Spektrum, Berlin. ISBN 978-3-662-55870-6

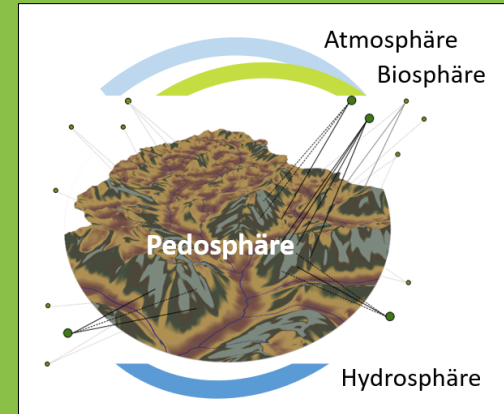


# DANKE

für die Aufmerksamkeit!

Prof. Dr. Mareike Ließ

WS 25/26



*Applied Sciences  
for Life*