

Pedosphäre

Hinweise zu den Kärtchen

Die Kärtchen wurden für die Prüfung nach dem SS 2005 bei Ruben Kretzschmar geschrieben.

Skript:

Pedosphäre

Einführung in die Bodenkunde

Unterlagen zur Vorlesung

Version 1.0

<http://www.ito.umnw.ethz.ch/SoilChem/bodenkunde>

Kapitel 7 bis 10 inkl. Glossar

Erstellt von: Thomas Kuster (4. Semester, D-UWIS)

Verfügbar via: <http://fam-kuster.ch>

Fluvial

Als fluvial oder fluviatil (lat. fluvius, Fluss, fluvial bedeutet „von Flüssen verursacht“) werden in den Geowissenschaften Vorgänge und Gesteinsschichten bezeichnet, die mit Flüssen und ihrem Gesteintransport bzw. Ablagerungen in Zusammenhang stehen.

Verlehmung

Anstieg des Tongehalts auf Grund von chemischer Verwitterung des Bodens.

Es sind insbesondere die Silikate Muskovit und Biotit (Glimmer), aus denen die Tonminerale Illit oder Vermikulit entstehen.

Äolisch

Allgemein und insbesondere in der Geologie die vom Wind verursachten Erscheinungen wie zum Beispiel der äolische Transport.

Schluff

Silt (übernommen aus dem Englischen, auch Schluff) sind Feinböden, unverfestigte, in der Regel klastische Sedimente und Sedimentgesteine, die zu mindestens 95% aus Komponenten in einer Korngrösse von $2\ \mu\text{m}$ (0.002 mm) bis $50\ \mu\text{m}$ (0.05 mm) bestehen.

Weiter Unterteilung in:

Grobschluff (gU) $20 - 63\ \mu\text{m}$ (0.02 - 0.063 mm)

Mittelschluff (mU) $6.3 - 20\ \mu\text{m}$ (0.0063 - 0.02 mm)

Feinschluff (fU) $2 - 6.3\ \mu\text{m}$ (0.002 - 0.0063 mm)

Ton

Die Korngröße von siliziklastischen Gesteinen und klastischen Karbonatgesteinen, wobei es sich bei beiden Gruppen um Sedimentgesteine handelt. Korngröße von $< 2 \mu\text{m}$ (0.002 mm). Weiter Unterteilung in:

Grobton (gT) $0.63 - 2 \mu\text{m}$ (0.00063 - 0.002 mm)

Mittelton (mT) $0.2 - 0.63 \mu\text{m}$ (0.0002 - 0.00063 mm)

Feinton (fT) $< 0.2 \mu\text{m}$ (< 0.0002 mm)

Sand

Zerkleinertes Gestein 63 - 2000 μm (0.063 - 2 mm), das von Wind und Wasserbewegung zu Sandstränden, Dünen u. ä. aufgehäuft werden kann. In diesem Fall spricht man von einem Lockersediment. Die mineralische Zusammensetzung von Sand kann je nach Ort sehr stark variieren (z. B. weisser Sand am Strand aus Korallenskeletten, Muscheln (Kalziumkarbonat (CaCO_3))). Der Grossteil der Sandvorkommen besteht allerdings aus Quarz (Siliziumdioxid SiO_2), denn er ist nicht nur häufig, sondern auch mit einer Härte von 7 auf der 10-stufigen Mohs'schen Härteskala besonders verwitterungsresistent.

Weiter Unterteilung in:

Grobsand (gS) 630 - 2000 μm (0.63 - 2 mm)

Mittelsand (mS) 200 - 630 μm (0.2 - 0.63 mm)

Feinsand (fS) 63 - 200 μm (0.063 - 0.2 mm)

Lehm

Lehm ist ein Sediment, aus chemischer verwittert von Gesteinen. Lehm ist eine feine Mischung unterschiedlicher Mineralien. Man unterscheidet je nach Entstehung Berglehm, Gehängelehm, Geschiebelehm, Lösslehm und Auenlehm .

Er besteht im Wesentlichen aus Ton, Sand und Schluff, dazu kommt noch Kalk. Es gibt keine klare Abgrenzung zum Ton, tonreiche Lehme nennt man fett, tonarme mager. Lehm ist nicht so plastisch wie Ton und auch nicht so wasserundurchlässig, da die Sedimente im Ton kleiner sind als im Lehm. In feuchtem Zustand ist Lehm formbar, in trockenem Zustand fest. Bei Wasserzugabe quillt Lehm, beim Trocknen schwindet er.

humides Klima

Humides Klima ist gleichbedeutend mit feuchtem Klima, in dem die jährlichen Niederschläge grösser sind als die Verdunstung.

Klima mit einer positiven Wasserbilanz.

Abrasion

Steine werden gegeneinander geschlagen und kleine Partikel werden abgesprengt, die dann mit dem Wasser fortgetragen und flussabwärts sedimentiert werden.

Bodenfruchtbarkeit

Wann ist ein Boden fruchtbar, wann unfruchtbar?

- **landwirtschaftlich**

Ertragsfähigkeit des Bodens

- **ökologisch**

wenig ertragreiche Böden (hohe Artenvielfalt, enthalten oft auch seltene Pflanzenarten), z. B. nährstoffarme sehr trockene Standorte (Trockenrassen), sehr nasse Standorte (Hochmoore).

Bodenfruchtbarkeit (Definition)

Ein Boden gilt als fruchtbar, wenn:

- Er eine für seinen Standort typische artenreiche, biologisch aktive Lebensgemeinschaft und typische Bodenstrukturen sowie eine ungestörte Abbaufähigkeit aufweist.
- Natürliche und vom Menschen beeinflusste Pflanzen und Pflanzengesellschaften ungestört wachsen und sich entwickeln können und ihre charakteristischen Eigenschaften nicht beeinträchtigt werden.
- Die pflanzlichen Erzeugnisse eine gute Qualität aufweisen und die Gesundheit von Mensch und Tier nicht gefährden.
- Mensch und Tier, die ihn direkt aufnehmen, nicht gefährdet werden.

Ertragsfähigkeit

Global gesehen steht die Ertragsfähigkeit von landwirtschaftlich genutzten Böden im Vordergrund.

Es müsste zwischen **aktueller** und **potentieller** Ertragsfähigkeit unterschieden werden.

- Boden hat optimale Eigenschaften (tiefgründig, gut durchlüftet, nährstoffreich,...) aber zu wenig Wasser \Rightarrow **aktuelle** Ertragsfähigkeit gering. Bewässern \Rightarrow Ertragsfähigkeit gross \Rightarrow hohe **potentielle** Ertragsfähigkeit. Z. B. Schwarzerden der Steppenregionen).
- Falsche Bewässerung \Rightarrow Verdichtung, Verringerung der Wasserleitfähigkeit, Versalzung des Bodens \Rightarrow **potentielle** Ertragsfähigkeit sinkt.
- \Rightarrow Ertragsfähigkeit ist **keine** statische Bodeneigenschaft.

Nährstoffreserven (vorallem P, N) vieler Böden (Tropen, Subtropen) sind sehr gering und entsprechend schnell erschöpft.

Landnutzungssysteme mit ausreichender Nährstoffrückführung die auch bei zunehmender Bevölkerungsdichte nachhaltig sind müssen entwickelt werden.

Böden bestehen aus...
(grobe gesehen)

mineralischen und organischen Festphasen (ca. 40-60 Vol %) und Poren (ca. 60-40 Vol %), die mit Wasser oder Luft gefüllt sein können.

Wodurch wird der Porenraum bestimmt, was wird dadurch beeinflusst?

- Porenraum wird durch Korngrößenverteilung (Textur) und die Anordnung der festen Bodenteilchen im Raum (Struktur, Lagerungsdichte) bestimmt.
- Porengrößenverteilung und Porenvernetzung beeinflussen massgeblich den Wasser- und Gashaushalt des Bodens
- Indirekt auch den Wärmehaushalt (Wärmeleitfähigkeit , Wärmespeicherung)

Körnung

Korngrößenklassen

Die mineralischen Partikel weisen in der Regel eine **kontinuierliche** Korngrößenverteilung auf (10^{-9} m, 1 nm bis 10^{-3} m, 1 mm oft auch bis 10^{-1} m, 1 dm)

Feinerde (< 2 mm)

Ton (< 2 μm)

Schluff (2 bis 50 μm)

Sand (50 bis 2000 μm)

Skelett (> 2 mm)

Kies (2 bis 50 mm)

Steine (50 bis 200 mm)

Blöcke (> 200 mm)

Die einzelnen Körngrößenklassen werden oft noch weiter unterteilt z. B. in Feinsand, Mittelsand und Grobsand, dieses künstliche System ist weltweit nicht einheitlich, aber ähnlich (siehe Abbildung 7.1 S. 85).

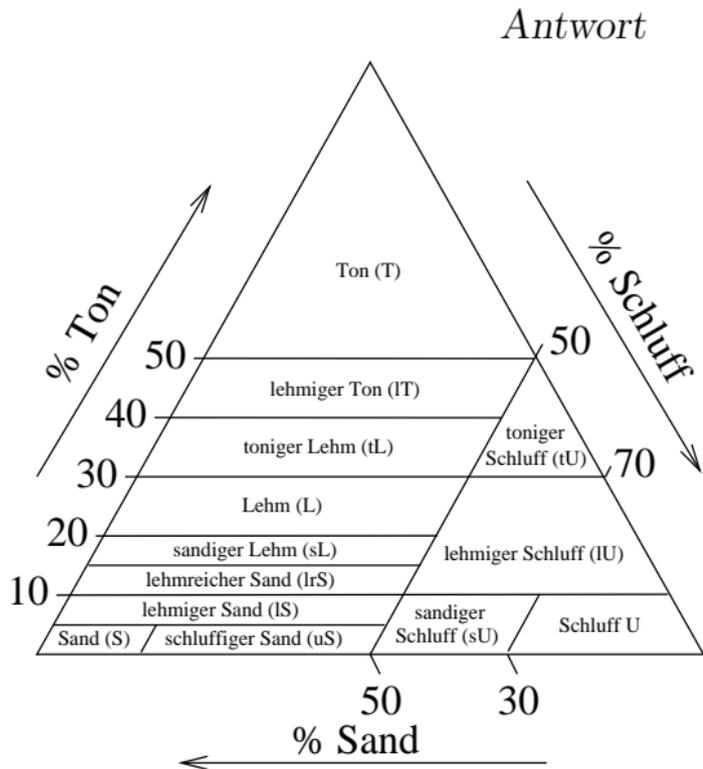
Körnung/Textur

Die Grössenverteilung der Feinerde (<2 mm) eines Bodens bezeichnet man als **Körnung** oder **Textur**.

Anstelle der kontinuierlichen Grössenverteilung werden meistens die gravimetrische Gehalte (Massenanteile) an Ton, Schluff und Sand bestimmt (**Körnungsdreieck**).

Körnungsdreieck

Auf Grund der verschiedenen Gemische an Ton, Schluff und Sand werden die Böden in verschiedene Bodenarten eingeteilt z. B. sandiger Lehm (15-20% Ton, <50% Schluff, (>50% Sand)), sehr nützlich für Bodenbewertung, Bodenklassifikation und Kartierung.



Wie kommt eine bestimmte
Korngrößenverteilung eines Bodens
zustande?

Ausgangsgestein Junge Böden „erben“ ihre Korngrößenverteilung vom Ausgangsgestein.

Physikalische Verwitterung Feste Gesteine werden durch physikalische Verwitterung zerteilt.

Chemische Verwitterung, Mineralneubildung vollständige oder teilweise Auflösung von primären Mineralien und Bildung von sekundären Mineralien.

Umlagerung und Sortierung Der Transport von Partikel durch Wind oder Wasser bewirkt meistens eine Sortierung der Korngrößen.

Je nach Ausgangsgestein und Bodenbildung entsteht also eine unterschiedliche Korngrößenverteilung, die ein wichtiger Parameter für die Bodenfruchtbarkeit bzw. die Standorteigenschaften darstellen.

Korngrößenverteilung auf Grund des Ausgangsgesteins

Ausgangsgestein Junge Böden „erben“ ihre Korngrößenverteilung vom Ausgangsgestein:

Granit (saurer Tiefengestein, grobkörnig) → Böden mit höherem Sandgehalt als Böden auf einem Basalt.

Basalt (basisches Ergussgestein, feinkörnig) → Böden mit tieferem Sandgehalt als auf Granit.

Kalkstein → tonreiche (60-70% Ton) Böden (Tonpartikel bleiben bei der Kalkauflösung zurück)

Löss (schluffreiches äolisches Sediment) → Schluffreich (50-70% Schluff)

Sanderflächen (sandige, fluviatile Sedimente) → sandige (80-90% Sand) Böden

Moränenmaterial Böden auf Moränenmaterial enthalten oft alle Korngrößen (grosse Steine bis Ton, oft lehmige Feinerde mit mehr oder weniger Skelett).

Korngrößenverteilung auf Grund physikalischer Verwitterung des Ausgangsgesteins

Feste Gesteine werden durch physikalische Verwitterung zerteilt bis zu den einzelnen Kristallen, die in Tiefengesteinen gröber sind als in Ergussgesteinen, möglich durch:

- Frostsprengung
- Temperatursprengung
- Salzsprengung, auskristallisieren von Salz in Rissen
- Wurzelsprengung
- Abrasion, in Bächen, Flüssen und Hanglagen

Korngrößenverteilung auf Grund chemischer Verwitterung und Mineralneubildung des Ausgangsgesteins

Vollständige oder teilweise Auflösung von primären Mineralien und Bildung von sekundären Mineralien wodurch im Laufe der Bodenbildung der Skelett-, Sand-, und Schluffgehalt ab (primäre Mineralien) und der Tongehalt zu (sekundäre Mineralien).

In stark verwitterten Böden (Tropen, Subtropen) findet man kaum noch primäre Mineralien (ausser Quarz) und einen erhöhten Tongehalt.

Den Anstieg des Tongehalts durch chemische Verwitterung von Silikaten nennt man auch **Verlehmung**

Korngrößenverteilung auf Grund Umlagerung und Sortierung des Ausgangsgesteins

Der Transport von Partikel durch Wind oder Wasser bewirkt meistens eine Sortierung der Korngrössen, weil gröbere Partikel zuerst (bei höheren Fließgeschwindigkeiten) abgelagert werden und feinere weiter transportiert werden.

Beispiele:

Löss Sehr schluffreiches äolisches Sediment (50-80% Schluff), meist in periglazialen Gebieten.

fluviale Sande (Flussablagerungen), die oft bis zu 95% Sand enthalten. In Flussauenlandschaften wird die Textur der Böden oft mit zunehmender Entfernung vom Flussbett feiner, weil die Fließenergie des Wassers bei Überschwemmungen abnimmt.

Bodenstruktur, Gefüge (Allgemein, Begriffe)

Mineralischen Partikel liegen meistens nicht als lose Schüttung (Sanddüne) oder gleichmässig kompakte Packung (kompaktes Sediment) vor, sondern bilden sogenannte **Bodenaggregate**.

Die Begriffe **Gefüge** oder **Bodenstruktur** bezeichnen die Art der Anordnung der festen Bodenpartikel im Raum.

Gründe für die Entstehung der Bodenaggregate (Beispiele)

Die Entstehung der Bodenaggregate kann auf **biologische**, **physikalische** oder **chemisch-physikalische** Prozesse zurückgeführt werden.

Beispiele:

- Krümelgefüge
- Polyedergefüge (tonreich) und Subpolyedergefüge (lehmig-schluffig)
- Klumpengefüge (gross) oder Bröckelgefüge (klein)

Krümelfüge (Entstehung, Eigenschaften)

Hohe biologische Aktivität in Oberböden mit günstigem pH und Nährstoffbedingungen schafft ein stabiles **Krümelgefüge** (locker gelagertem rundlich geformte Aggregate), welches durch wühlende und verklebende Tätigkeiten von Bodentieren (z. B. regenwürmer) entsteht. Oberböden mit einem Krümelgefüge sind gut druchlüftet, gut durchwurzelbar und erlauben eine rasche Wasserinfiltration bei Niederschlägen.

Polyedergefüge, Subpolyedergefüge,
Prismengefüge
(Entstehung, Eigenschaften)

Alle diese Gefüge entstehen durch Quellen und Schrumpfen von Böden bei Austrocknung und Wiederbefeuchten.

Polyedergefüge In tonreichen Böden entstehende kantige Bodenaggregate.

Subpolyedergefüge In lehmig-schluffigen Böden entstehend, die Kanten sind nicht ganz so scharf wie die der Polyedergefüge.

Prismengefüge (grosse Aggregate die hochkant im Boden angeordnet sind). Im Unterboden, der nicht oft vollständig austrocknet, die Aggregate sind grösser und die Schrumpfrisse gehen senkrecht in den Boden. Relativ gross Zerfallen in Polyedergefüge.

Klumpengefüge, Bröckelgefüge (Entstehung, Eigenschaften)

Durch die Bodenbearbeitung (Landwirtschaft) werden die Aggregate mechanisch zerkleinert und beliebig gebrochen:

Klumpengefüge gross

Bröckelgefüge klein

Bedeutung des Bodengefüges

- Die Bodenstruktur ist extrem wichtig für die Bodenfruchtbarkeit, vor allem in tonigen und lehmigen Böden.
 - Falls die Bodenpartikel **Aggregate** bilden, gibt es meistens zwischen den Aggregaten grössere Poren, diese fördern:
 - Durchlüftung
 - Wasserinfiltration
 - Durchwurzelbarkeit
 - Stabiles Aggregategefüge, vermindert die Neigung des Bodens zu:
 - Verschlämmung
 - Verkrustung
 - Bodenerosion
- erleichtert:
- Bodenbearbeitung

Bedeutung der Makroporen

Makroporen ($>50 \mu\text{m}$) sind besonders wichtig für:

Gasaustausch zwischen Atmosphäre (O_2 -reich) und Bodenluft (CO_2 -reich (Atmung Wurzeln, Mikroorganismen)), schnell in Luftgefüllten Makroporen, stark gehemmt in wassergefüllten.

Wasserinfiltration und -speicherung Infiltration verläuft besonders schnell in gut vernetzten Makroporen. Für die Wasserspeicherung sind vorallem Feinporen ($<0.2 \mu\text{m}$), Mittelporen ($0.2-10 \mu\text{m}$) und enge Grobporen ($10-50 \mu\text{m}$) von Bedeutung.

Lebensraum Tiere der Meso- und Makrofauna brauchen Makroporen als Lebensraum. Manche Tiere schaffen sich selbst Poren (z. B. Regenwürmer), andere sind auf bestehende Poren angewiesen.

Transportvorgänge Alle Transportvorgänge im Boden (Gase, Wasser, gelöste Stoffe), werden durch das Porensystem massgeblich beeinflusst. Makroporen bilden oft präferentielle Fließwege für Wasser und gelöste Stoffe.

Eindringwiderstand für Wurzeln wird bestimmt durch die Lagerung der Bodenpartikel und den Porenraum. In sehr dicht gelagerten Böden ist das Wurzelwachstum stark gehemmt.

Porosität und Lagerungsdichte

Die Porosität, Porengrößenverteilung und Vernetzung im Boden wird durch die Textur (Korngrößenverteilung) und das Gefüge (Aggregation) des Bodens bestimmt.

Porosität E (Definition)

Porosität

$$E = \frac{V_P}{V} = 1 - \frac{\rho_a}{\rho_r}$$

mit

$$\rho_a = \frac{M_m}{V}$$

$$\rho_r = \frac{M_m}{V_m}$$

E Porosität

V Gesamtvolumen

V_P Porenvolumen

V_m Bodenpartikelvolumen

ρ_a Lagerungsdichte (Dichte mit Poren)

ρ_r relle Dichte (Dichte Festanteil, „ohne“ Poren)

M_m Masse Bodenpartikel in V

Reelle Dichte von:
Quarz, Feldspäten und Böden

Festphase	Relative Dichte [$\text{g/cm}^3 = \text{kg/l}$]
Quarz	2.65
Feldspäte	2.54 - 2.76
Böden	2.55 - 2.75

Alle ≈ 2.6 .

Typische Lagrundsichten von Böden

ρ_a [g/cm ³ = kg/l]	Beschreibung	Vorkommen
<0.9	extrem locker	Torfe, Tone, vulkanische Böden
0.9 - 1.1	locker	sehr lockere Oberböden
1.1 - 1.3	mittel	Oberböden, Unterböden
1.3 - 1.5	leicht verdichtet	Unterböden
1.5 - 1.7	dicht	verdichtete Unterböden
>1.7	extrem dicht	stark verdichtete Sedimente

Primär- und Sekundärporen

Primärporen Die Bodenmatrix besteht aus Partikeln verschiedener Grössen (0.01 - 2000 μm) und Form \Rightarrow Primärporen zwischen den Partikel unterschiedlicher Grösse und Form (in den Aggregaten).

Sekundärporen In aggregierten Böden grobe Poren **zwischen den Aggregaten**.

Sickerwasser

Wasser welches auf Grund der Schwerkraft aus dem Boden ausfliessen kann.

Sättigt man einen Boden mit Wasser und lässt ihn anschliessend frei dränen, so füllen sich die grossen Poren wieder mit Luft, weil das Wasser durch die Schwerkraft nach unten absickert. Dieses Wasser nennt man Sickerwasser.

Adsorptionswasser

Kapillarwasser

Teil des Wasser der als Wasserfilm um feste Bodenpartikel (**Adsorptionswasser**) und in feinen oder mittleren Poren (**Kapillarwasser**) gegen die Schwerkraft zurück gehalten wird und somit im Boden gespeichert.

Wird auch als **Haftwasser** bezeichnet.

(Adsorptionswasser (und Kapillarwasser?) ist für Pflanzen nicht verfügbar).

freies Wasser

Wasser welches nicht durch Kräfte im Boden festgehalten wird, aber trotzdem nicht versickern kann, da die Versickerung gehemmt ist (z. B. durch eine Stauschicht).

Grundwasser Stauwasser

Grundwasser Ganzjährig mit Wasser gesättigter Boden.

Stauwasser Boden der im Jahresverlauf nur zeitweise gesättigt ist.

Matrixpotential

Wasser wird unterschiedlich stark im Boden gebunden. Man kann dies auch als sogenanntes **Matrixpotential** ausgedrücken.

Hydraulisches Potenzial des Wassers (Formeln und Erklärung)

$$\psi_H = \psi_z + \underbrace{\psi_m + \psi_g + \psi_o}_{\psi_W}$$

ψ_H	hydraulisches Potential
ψ_z	Gravitationspotential
ψ_m	Matrixpotential
ψ_g	Gaspotential
ψ_o	osmotische
ψ_W	Wasserpotential

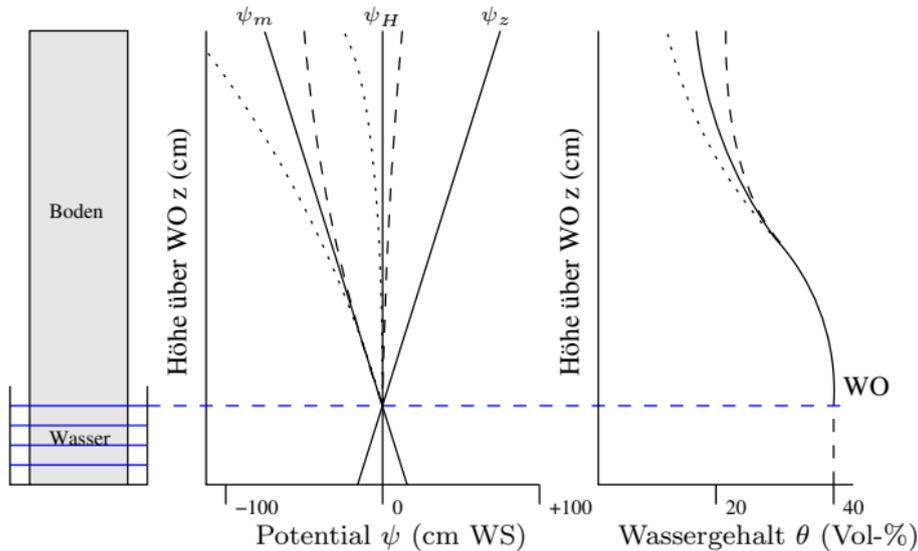
Wasserspannung entspricht dem negativen Wert des Wasserpotentials, also der Saugspannung (=Unterdruck).

Im Allgemeinen kann das Gaspotential (nur nicht falls Luftdruck im Boden anders als am Bezugspunkt (z. B. in Experimenten zur Wasserbindung)) und das osmotische Potential (nur nicht in ariden Gebieten und Böden der Salzmarschen) vernachlässigt werden.

Wasser bewegt sich immer in Richtung des niedrigsten hydraulischen Potentials bis ein Gleichgewicht herrscht:

$$\psi_H = \psi_z + \psi_m = 0$$

Hydraulisches Potenzial und Wassergehalt (Grafik)



··· Aufwärtsbewegung — Gleichgewicht - - Abwärtsbewegung (Regen)

Bezugspunkt: Grundwasserspiegel/Wasseroberfläche (WO) $\psi_z = 0$.
 Nicht-linearer Wassergehaltverlauf der von der Porosität,
 Porengrößenverteilung und Textur abhängt.

pF-Kurve

(Beziehung, Messart, Beeinflussung,
Hysterese)

Beziehung Beziehung zwischen Wasserspannung und Wassergehalt ($pF = \log(-\psi_W) = \log(-(\psi_m + \psi_g + \psi_o))$).

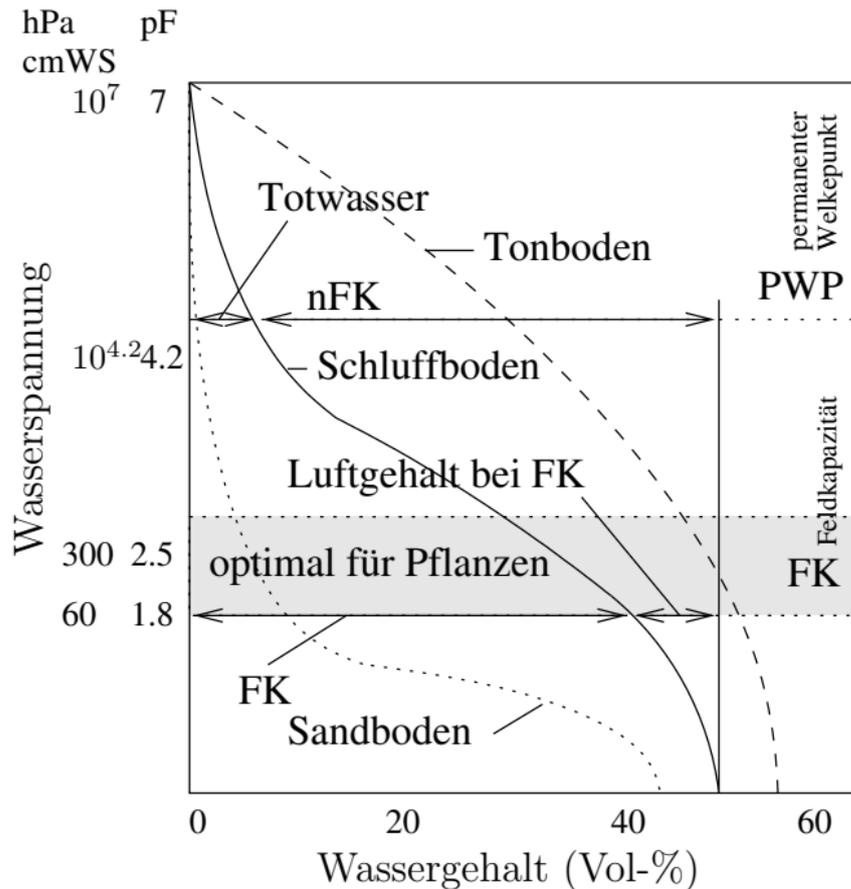
Messung Wird meist als Desorptionskurve gemessen, d. h. eine Bodenprobe wird vollständig mit Wasser gesättigt und dann Schrittweise bei steigendem Druck entwässert.

Beeinflussung Bodengefüge beeinflusst die pF-Kurve vor allem im Bereich niedriger Wasserspannung ($pF < 2$), weil das Gefüge vor allem die sekundären Makroporen beeinflusst

Hysterese pF-Kurve ist keine eindeutige Beziehung für einen bestimmten Boden. Hysterese-Effekt tritt auf wenn z. B. vom gesättigten Zustand entwässert wird und dann wieder befeuchtet auf Grund von eingeschlossener Luft, Benetzungseffekte, Flaschenhalseffekte und Matrixdeformation.

pF-Kurve

(Grafisch: Einfluss der Textur und des Gefüges)



nicht pflanzen-
verfügbares
verfügbares
pflanzen-

Einfluss der Textur
Ist verantwortlich
für den Hauptunter-
schied der drei
Kurven Sand-,
Schluff-, und Ton-
boden

Einfluss des Gefüges
Beeinflusst die
pF-Kurve vor allem
im Bereich niedriger
Wasserspannung:
pF < 2

Wasserbewegung im Boden

Warum?

Von was hängt die Wasserbewegung ab?

Das hydraulische Gleichgewicht im Boden wird durch Verdunstung, Niederschläge und Pflanzenwachstum gestört \Rightarrow Wasser ist in Bewegung in Richtung des niedrigsten hydraulischen Potentials.

Geschwindigkeit der Wasserbewegung im Boden

Die Geschwindigkeit im Boden hängt ab vom **hydraulischen Potential** und der **Wasserleitfähigkeit** des Bodens.

Darcy Gleichung

$$v = \frac{Q}{F} = K_f \frac{d\psi_H}{dx}$$

v Flussgeschwindigkeit [cm/s]

Q Wassermenge [cm³/s]

F Querschnittsfläche [cm²]

K_f hydraulische (gesättigte) Leitfähigkeit [cm/s]

ψ_H hydraulisches Potential [cm]

x Distanz in Fliessrichtung [cm]

Die hydraulische Leitfähigkeit hängt vor allem von der Grössenverteilung der wasserleitenden Poren ab. Wenn der **Wassergehalt abnimmt** werden vor allem die grösseren Poren mit Luft gefüllt und die **Leitfähigkeit** nimmt im Vergleich zum gesättigten Boden **stark ab**. Wasserleitfähigkeit eines Sandbodens ist niedriger als die eines Leimbodens wenn die Wasserspannung auf pF > 2 ansteigt!

Werte der Wasserleitfähigkeit von wassergesättigten Böden

Bodenart	Wasserleitfähigkeit K_f			
	[cm/s]		[cm/d]	
Sande	$\approx 4 \cdot 10^{-1}$	- $4 \cdot 10^{-3}$	$\approx 3 \cdot 10^4$	- $3 \cdot 10^2$
Schluffe	$\approx 4 \cdot 10^{-1}$	- $5 \cdot 10^{-5}$	$\approx 3 \cdot 10^4$	- 4
Lehme	$\approx 4 \cdot 10^{-1}$	- $1 \cdot 10^{-5}$	$\approx 3 \cdot 10^4$	- 1
Tone	$\approx 4 \cdot 10^{-1}$	- $4 \cdot 10^{-7}$	$\approx 3 \cdot 10^4$	- $1 \cdot 10^{-2}$

Weniger als 4 mm pro Sekunde bzw. 300 m am Tag.

In Tonen sinkt die Fließgeschwindigkeit bis zu 0.1 mm pro Tag!

Wasserbilanz und Bodenwasserregime

$$N + Z = ET + V + A + \Delta S$$

N Niederschlag

Z laterale Zufluss (Grund-, Oberflächenwasser)

ET Evapotranspiration (Verdunstung)

V Versickerung

A lateraler Abfluss (Grund-, Oberflächenwasser)

ΔS Änderung in der Wasserspeicherung im Boden

A und Z hängen stark von Hangneigung und Reliefposition ab

V (und damit der Beitrag zur Grundwasserneubildung) wird massgeblich von allen anderen Grössen beeinflusst.

$\Delta S = 0$ gilt für längere Zeiträume (1 Jahr).

$N \nearrow \Rightarrow V \nearrow$ oder $\nearrow A (\Rightarrow \text{Bodenerosion})$

Wasserspeicherung S gross $\Rightarrow V \searrow$ und $ET \nearrow$, bzw. S klein unter gleichen klimatischen Bedingungen mehr Grundwasserbildung.

Klassifizierung des Wasserhaushalts von Böden

Der Wasserhaushalt von Böden wird in verschiedene

Bodenfeuchte-Regime eingeteilt. Dazu wird die durchschnittlichen Anzahl von trockenen ($pF > 4.2$), feuchten ($pF < 4.2$) oder nassen ($pF \approx 0$) Tage in einer bestimmten Bodentiefe zugrunde gelegt (US Soil Taxonomy).

Boden- feuchte- Regime	Beschreibung	Vorkommen (Beispiele)
Aquic	Ständig nass, reduzierend	Grundwasserböden
Udic	Meist Feucht, aber nicht nass	Humide Klimate
Ustic	Zeitweise Feucht, aber mit Trocken zeit	Subtropische Zone
Aridic	Fast immer trocken	Aride Klimate
Torric	Meist trocken	Semiaride Klimate
Xeric	Feucht, aber trockener Sommer	Mediterrane Klimate

Wasserversorgung der Pflanzen

Siehe auch pF-Kurve (Grafisch: Einfluss der Textur und des Gefüges) (85)
permanenter Welkepunkt (PWP) Wenn der Boden trockener als der PWP ($pF = 4.2$) wird können die meisten Pflanzen kein Wasser mehr aus dem Boden aufnehmen (permanente Welke der Pflanzen).

Totwasser Wasser welches von der Bodenmatrix festgehalten wird und nicht Pflanzenverfügbar ist.

Feldkapazität (FK) Wasser welches der Boden gegen die Schwerkraft längere Zeit halten kann. In der Praxis zwischen pF 1.8 und 2.5 abgeschätzt.

nutzbare Feldkapazität (nFK) Pflanzennutzbarer Anteil der FK.

Pflanzenverfügbaren Wassermenge (W_{pfl}) Abschätzung der maximal gespeicherten Menge aus dem effektiven Wurzelraum (WR_{eff}) und nFK:

$$W_{pfl} [\text{mm}] = nFK [\text{mm/dm}] \cdot WR_{eff} [\text{dm}]$$

Wassergehalt beim PWP	Ton	>	Schluff, Lehm	>	Sand
FK	Ton	>	Schluff, Lehm	>	Sand
nFK	Ton	<	Schluff, Lehm	>	Sand

Optimaler Grundwasserstand für die Landwirtschaft

Sandböden \approx 50 cm

Schluff- und Lehm Böden 1.4 bis 1.8 m

Tonböden 0.9 bis 1.3 m

Dies ist durch die Unterschiede hinsichtlich kapillarem Aufstieg und Wasserleitfähigkeit begründet.

Lufgehalt von Böden

Tendenziell sind immer die grössten Poren mit Luft gefüllt (die kleineren mit Wasser) \Rightarrow nasse Böden sind schlecht und trockene gut durchlüftet. Der Luftanteil schwankt je nach aktueller Bodenfeuchte zwischen 0 und 40 Vol-%

Boden	Vol-% Luft
Sandböden	30 - 40
Schluffböden	10 - 25
Tonböden	5 - 10

Dies sind nur grobe Werte da der Anteil stark vom Bodengefüge (grosse sekundär Poren zwischen den Bodenaggregaten) abhängt und somit von allen Faktoren die das Gefüge beeinflussen wie Verdichtung, Bodenbearbeitung, Verschlämmung,

Zusammensetzung der Bodenluft Gase und ihre Entstehung sowie Partialdrücke

Bodenluft enthält immer weniger O_2 und mehr CO_2 als atmosphärische Luft (Bodenorganismen (Bakterien, Pilze, Tiere) und Pflanzenwurzel atmen).

aerobe Bedingungen:

$C_6H_{12}O_6 + 6O_2 \rightarrow 6CO_2 + 6H_2O + 2800kJ/Mol$ (es werden equimolare Mengen an O_2 und CO_2 gebraucht Respirationsquotient $R = 1$).

stark anaerobe Bedingungen: $C_6H_{12}O_6 \rightarrow 3CO_2 + 3CH_4 + 188kJ/Mol$ ($R > 1$) \Rightarrow erhöhter Gasdruck, Gas entweicht durch konvektiven Transport (aufsteigende Gasblasen in Sümpfen).

Methan entsteht z. B. in Mooren, Sümpfen (Sumpfgas), Reisfeldern, Müll-, Klär-, Hafenschlammdeponien (Biogas, Deponiegas).

Weiter Gase: N_2O (:-)-gas, Beiprodukt der Nitrifikation, vorallem bei Denitrifikation), NH_3 (Ammoniak, aus NH^+ bei hohem pH (kalkhaltigen bzw. alkalischen Böden)), H_2S (Schwefelwasserstoff, unter stark aneroben Bedingungen in schwefelreichen Sedimenten).

Partialdrücke: pO_2 : kann bis auf nahezu 0 verringert sein (z. B. wenn Boden nass ist), Atmosphäre: 0.207 pCO_2 : kann bis auf 0.1 erhöht sein, Atmosphäre: 0.00035

Gastransport

Arten von Gastransport

Konvektion Druckdifferenzen führen zu einem konvektivem Gastransport im Boden.

Druckdifferenzen werden verursacht durch:

- Entstehen durch Schwankungen des Grundwasserspiegel
- Verdrängung von Gasen durch infiltrierendes Wasser
- Temperaturschwankungen
- Gasentstehung in anaeroben Zonen

Diffusion Sehr wichtig ist der Gastransport durch Diffusion (Diffusion von O_2 in Luft ist ≈ 1000 mal schneller als in Wasser). Aus diesem Grund ist der Wassergehalt, die Verteilung von Wasser und Luft die Vernetzung von luftgefüllten Poren ausschlaggebend für die Gasdiffusion.

Gashaushalt und Pflanzenwachstum

Was führt zu einer Hemmung des Pflanzenwachstums

Wurzelatmung und damit das Pflanzenwachstum kann gehemmt sein wenn:

Partialdrücke $p\text{O}_2 < 0.1$ und $p\text{CO}_2 > 0.05$ sind.

Toxische Gase (Ethylen und H_2S) sich anreichern aufgrund einer schlechten Durchlüftung des Boden.

In den meisten Böden ist es ausreichend, wenn $\geq 15\%$ des Gesamtvolumen aus Poren besteht die mit Luft gefüllt sind, bei niedrigem Luftgehalt entsteht akute Gefahr für O_2 -mangel (Luft \neq O_2 ???)

Verdichtete Schichten wie Pflugsohle (nur wenige cm dick) können die O_2 -Diffusion stark einschränken weil die luftgefüllten Poren unterbrochen sind.

Nebenbei: Böden sind wichtige Senken und Quellen von klimarelevanten Gasen wie z. B. CO_2 , CH_4 und N_2O

Wärmehaushalt Bodentemperatur

Bodentemperatur ist ein wichtiger Faktor in der Landwirtschaft und für die Bodenbildung, beeinflusst direkt das Wachstum der Pflanzen und den mikrobiologischen Abbau der organischen Substanzen. Die Bodenoberfläche weist die grössten Temperaturschwankungen auf (mit einem Teil der Sonneneinstrahlung direkt, strahlt jedoch auch wieder Energie ab).

Die Wärme wird im Boden gespeichert und nach unten (oben) transportiert, dies hängt von der **Wärmekapazität** und **Wärmeleitfähigkeit** ab, welche wiederum von der Zusammensetzung und dem Wassergehalt abhängen.

Temperaturschwankungen sind an der Oberfläche am grössten und nehmen mit zunehmender Tiefe ab.

Tagesschwankungen nehmen mit der Tiefe stark ab, in 50 cm Tiefe $<1\text{ }^{\circ}\text{C}$

Jahresschwankungen nehmen mit der Tiefe stark ab, in 8 m Tiefe herrscht eine Temperatur die etwa dem Jahresmittelentspricht.

Siehe auch Abbildung 7.12 und 7.13

Klassifikation des Wärmehaushalts von Böden

soil temperature regimes (nach US Soil Taxonomy)

ΔT ¹	Jahersmittel der Temperatur in 50 cm Tiefe (°C)				
	<0	0 bis 8	8 bis 15	15 bis 22	>22
>5	pergelic	frigid	mesic	thermic	hyperthermic
<5	pergelic	cryic	isomesic	isothermic	isohyperthermic

¹ Differenz der Mittelwerte der Sommer- und Wintermonate:

Nordhalbkugel: Sommermonate: Juni, Juli, August; Wintermonate:

Dezember, Januar, Februar.

Die Böden um Zürich haben also ein **mesic soil temperature regime**.

Physikalische Aspekte der Bodenfruchtbarkeit (landwirtschaftlich)

- Durchwurzelbarkeit
 - tiefgründig
 - nicht stark verdichtet
- Wasserversorgung
 - hohe nutzbare Feldkapazität
 - event. Kapillarer Anschluss ans Grundwasser
- geringe Erosion und Verschlammung
 - ausreichende Wasserinfiltration
- O₂-Versorgung
 - ausreichende Drainage
 - ausreichende Durchlüftung

⇒ **tiefgründige Lehme mit lockerem Aggregatsgefüge**

Pflanzennährstoffe

Welche Arten von Nährelementen gibt es?
Einfluss auf Bodenfruchtbarkeit?

Pflanzen benötigen zum Wachstum CO_2 (Photosynthese) und O_2 (Atmung) aus der Luft sowie Wasser aus dem Boden.

essentielle Nährelemente 14 Elemente aus dem Boden, ohne die kein normales Wachstum möglich wäre. Ausser C, das durch Photosynthese assimiliert wird.

Makro-Nährelemente 6 die in grösseren Menge benötigt werden: N, K, Ca, Mg, P, S.

Mikro-Nährelemente 8 die nur in sehr geringen Mengen benötigt werden: Cl, Fe, Mn, Zn, B, Cu, Mo, Ni, für manche Pflanzen ist auch Na essentiell (z. B. Halophyten).

Für **Tiere und Menschen** essentielle Mikro-Nährelemente Cr, Se, I, Fe, V, Ni, Sn werden von Pflanzen ebenfalls in geringen Mengen aus dem Boden aufgenommen, wodurch sie in die Nahrungskette gelangen.

Bodenfruchtbarkeit: Die Nährelemente müssen **ausreichend** in **pflanzenverfügbarer Form** und zum **richtigen Zeitpunkt** vorhanden sein, sowie im **günstigen Verhältnis** zueinander (z. .B ist Ca aufnahme bei einen zuniedrigen Ca/Mg Verhältnis gehemmt).

Nährstoffvorrat und Verfügbarkeit

Arten der Verfügbarkeit

Pflanzen können Nährstoffe nur aufnehmen wenn sie als bestimmte Spezies vorliegen:

- als gelöstes freies kation oder Anion (z. B. Hauptnährelemente Kationen (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , NH_4^+) und Anionen (NO_3^- , SO_4^{2-} , HPO_4^{2-} , H_2PO_4^-)).
- als gelöster anorganischer Komplex
- als niedermolekularer organischer Komplex (nur manche)

In der Regel liegen nur sehr kleine Teile des gesamten Nährstoffvorrats gelöst in der Bodenlösung vor, der rest ist in Unterschiedlicher Form an bzw. in die Festphase des Bodens gebunden.

Nährstoffvorrat und Verfügbarkeit

Nachlieferung

Während der Vegetationsperiode müssen Nährstoffe aus den Festphasen in die Bodenlösung nachgeliefert werden. Die Nachlieferungsrate hängt ab von

- chemischen Bindungsformen
- Bodenfeuchte
- Bodentemperatur
- Aktivität der Mikroorganismen

Beispielsweise werden austauschbar von Tonmineralien adsorbierte Kationen sehr schnell nachgeliefert, während Kationen im Kristallgitter von Mineralien nur sehr langsam durch Verwitterung freigesetzt werden. Die Nachlieferung von N und P aus der organischen Substanz hängt stark ab von:

- deren Zusammensetzung
- Aktivität von Mikroorganismen und daher auch von
- Temperatur
- Bodenfeuchte

Nährstoffvorrat und Verfügbarkeit

Unterschiedliche Bindungsformen der Nährstoffe und ihre Verfügbarkeit

Die Nährstoffe können im Boden in unterschiedlichen Bindungsformen vorkommen, die nicht alle gleich gut pflanzenverfügbar sind, z. B.:

- Sehr leicht pflanzenverfügbar:
 - als freie Ionen oder Komplexe in der Bodenlösung
 - als lösliche Salze
 - austauschbar an Mineraloberflächen gebunden
- Mässig leicht pflanzenverfügbar:
 - spezifisch an Mineraloberflächen adsorbiert
 - an organische Substanzen komplexiert
- Nicht direkt verfügbar, durch Abbau von organischer Substanz aber nachlieferbar:
 - in Biomasse oder toter organischer Substanz eingebaut
- Nicht verfügbar, nur sehr langsam durch Mineralverwitterung nachlieferbar:
 - in Zwischenschichten von Tonmineralien
 - im Kristallgitter von Mineralen
 - in Fe Oxidpartikeln eingeschlossen (okkludiert)

Bodenreaktion und
Nährstoffverfügbarkeit
Was führt zu Versauerung?

Der **Boden pH-Wert (Bodenreaktion)** hat einen starken Einfluss auf die Verfügbarkeit von Nährstoffen und toxischen Metallkationen im Boden.

Regen führt ständig zu Säuren Eintrag, Wasser in Luft pH= 5.7, da sich CO₂ in Wasser löst: $\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_{2(g)} \rightleftharpoons \text{H}_2\text{CO}_3 \rightleftharpoons \text{HCO}_3^- + \text{H}^+$

Anthropogene Luftverschmutzung für zu starken Säuren wie HNO₃ und H₂SO₄ ⇒ pH 3-5.

Pflanzenwurzel und Mikroorganismen produzieren Säuren (Abgabe von CO₂).

Pflanzenwurzeln geben zum Ladungsausgleich Protonen an die Rhizosphäre ab, wenn sie mehr Kationen als Anionen aufnehmen (vor allem bei NH⁺ Ernährung).

Boden muss diesen Säureeintrag abpuffern, unter huminden Klimabedingungen wird er sonst schnell versauern. Viele Böden haben wirksame pH Puffersysteme, bis **Säureneutralitätskapazität (SNK)** erschöpft ist.

Bodenreaktion und

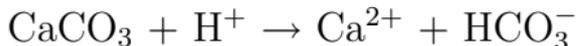
Nährstoffverfügbarkeit

Was wirkt der Versauerung entgegen?

Viele Böden haben wirksame pH Puffersysteme, bis

Säureneutralitätskapazität (SNK) erschöpft ist.

Böden die fein verteilte Carbonate (z. B. CaCO_3) enthalten, sind immer neutral bis leicht alkalisch (pH 7.2-8.2), Säure eintrag wird durch Auflösung von Kalk neutralisiert.



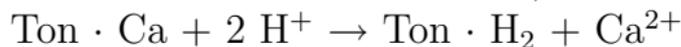
Unter humiden Klimabedingungen (positive Wasserbilanz) werden die HCO_3^- Ionen zusammen mit Ca^{2+} oder anderen Kationen ausgewaschen \Rightarrow der Boden versauert nicht, jedoch Abnahme von Carbonatgehalt und damit auch seine SNK.

In neutralen bis leicht basischen Böden sind über 80% der Kationenaustauschkapazität (KAK) mit Ca^{2+} belegt, und der Rest mit anderen „**basischen Kationen**“ Mg^{2+} , K^+ , Na^+ (chemisch gesehen keine Basen, Begriff der Bodenkunden, da die Kationentauscher in neutralen bis alkalischen Böden zu 100% mit diesen Kationen gesättigt sind). Die Basensättigung ist der prozentuale Anteil der KAK der mit basischen Kationen belegt ist. Basensättigung ist also nahezu 100% \Rightarrow oft ausreichend mit Nährstoffen versorgt, zumindest mit Ca^{2+} .

Bodenreaktion und
Nährstoffverfügbarkeit
Wann und wie versauert ein Boden?

Wenn ein Bodenhorizont vollständig versauert ist, kann er unter humidem Klima versauern. Freie Protonen werden nicht mehr durch die Auflösung von Kalk neutralisiert, sondern zunächst durch

Kationenaustauschreaktionen, z. B. an Tonmineralien:



Die adsorbierten Protonen greifen die Silikatstruktur an \Rightarrow **chemische Verwitterung** wodurch **Al³⁺ Ionen** frei werden, diese werden an den Kationenaustauscher gebunden und verdrängen somit andere Kationen, die ihrerseits mit dem Sickerwasser ausgewaschen werden. Damit **steigt** mit zunehmender Versauerung die **Al-Sättigung** der Kationenaustauscher. Basensättigung sinkt entsprechend, wodurch Kationenaustauschpuffersystem immer weniger wirksam wird.

Unterhalb pH 5 wird das Al-Puffersystem zunehmend wichtiger, z. B. nach der Gleichung:



Unterhalb von pH 5 nimmt auch die Al³⁺ Konzentration in der Bodenlösung mit sinkendem pH Wert stark zu.

Bodenreaktion und

Nährstoffverfügbarkeit

Probleme zu hoher Al^{3+}

Konzentration?

Woher kommt die hohe Al^{3+}
Konzentration?

Zu hohe Al^{3+} Konzentration in der Bodenlösung (vor allem im Verhältnis zu Ca^{2+} und Mg^{2+}) können zu einer starken **Hemmung des Wurzelwachstums** führen \Rightarrow sekundär zu **Wasser- und Nährstoffmangel** (P, Mg).

Selbst Pflanzen von relativ toleranten Waldbäumen (z. B. Fichte) können geschädigt werden wenn $\text{Ca}^{2+}/\text{Al}^{3+} < 1$ wird.

Saurer Regen \Rightarrow Versauerung schlecht gepufferter Böden \Rightarrow Waldsterben

Einstufung des pH Wertes von Böden in Säureklassen

Boden pH-Wert	Einstufung	Vorkommen
9.1 - 10.0	stark alkalisch	Na ₂ CO ₃ haltige Böden (aride Gebiete)
8.1 - 9.0	mässig alkalisch	
7.1 - 8.0	schwach alkalisch	CaCO ₃ haltige Böden
7.0	neutral	
6.0 - 6.9	schwach sauer	kalkfreie Böden mit hoher Basensättigung
5.0 - 5.9	mässig sauer	kalkfreie, leicht bis mässig versauerte Böden
4.0 - 4.9	stark sauer	kalkfreie, stark versauerte Böden
3 - 4	extrem sauer	saure organische Auflagen (Rohhumus)

pH Wert in der Landwirtschaft

pH Wert im mässigen bis schwach sauren Bereich (5-6 pH) wird angestrebt, je nach Tongehalt, Humusgehalt und Kulturpflanze.

In **sauren Böden** kann eine zu hohe Konzentration an Al und/oder Mn das Pflanzenwachstum durch **Toxizität oder Verdrängung von Nährstoffkationen** beeinträchtigen.

Bei zu **hohem pH Wert** kann die Verfügbarkeit von einigen **Mikronährstoffen zu gering** sein (z. .B Mn, Cu, Zn, Fe, B,...).

Verfügbarkeit von P ist im leicht sauren pH Bereich optimal, weil in sehr sauren Böden schwerlösliche Fe oder Al Phosphate und in neutralen bis alkalischen Böden schwer lösliche Ca Phosphate entstehen.

Arten von Adsorptionsprozesse

Adsorptionsprozesse spielen eine sehr wichtige Rolle für die Bioverfügbarkeit und Mobilität von Kationen und Anionen in Böden. Grundsätzlich zwei Arten:

Unspezifische Adsorption elektrostatische Anziehung zwischen Ionen und entgegengesetzt geladenen Mineraloberflächen bzw. organischen Substanzen (z. B. Kationenaustausch).

Spezifische Adsorption Chemisorption, durch die Bildung von Komplexen an Mineraloberflächen oder Komplexen mit funktionellen Gruppen der organischen Substanz.

Kationenaustausch

Kationenaustauschkapazität

Wichtigsten Kationen

Wichtigste Form der unspezifischen Adsorption in Böden, da die meisten Oberflächen in Böden negativ geladen sind. Die negative Ladung wird immer durch eine äquivalente Menge an austauschbaren Kationen ausgeglichen.

Die Kationenaustauschkapazität (KAK) eines Bodens entspricht der Gesamtmenge der negativer Oberflächenladung seiner Bestandteile [mol_c/kg , Mol Ladung pro kg].

Kationenaustauschreaktionen sind in der Regel schnell und reversibel.

Die wichtigsten sind Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ (basische Kationen) und Al^{3+} , H^+ (saure Kationen).

Basensättigung, Al-Sättigung Anteile

Basensättigung Ist der prozentuale Anteil der Kationenaustauschkapazität (KAK) der mit basischen Kationen abgesättigt ist.

Al-Sättigung Ist der prozentuale Anteil der KAK, der mit austauschbaren Al^{3+} abgesättigt ist.

In kalkhaltigen Böden beträgt die Basensättigung stets 100%, die Ca-Sättigung meistens über 90%.

Erst wenn Böden kalkfrei sind können sie versauern. Dabei sinkt dann die Basensättigung ab und die Al-Sättigung steigt an.

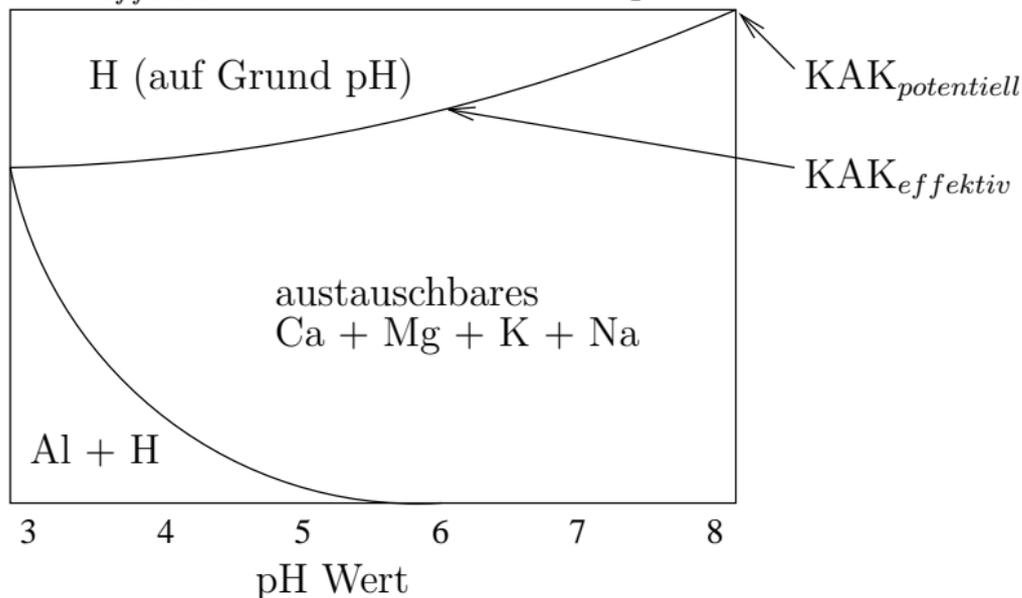
In sehr stark sauren Mineralböden beträgt die Al-Sättigung oft über 80% und die Basensättigung weniger als 20%.

Kationenaustauschkapazität (KAK)
und Sättigung der KAK mit basischen
und sauren Kationen
(Grafik)

Mit zunehmender Versauerung nimmt auch die effektive KAK ab, weil die negative Ladung durch Protonierung von Oberflächengruppen abnimmt.

$KAK_{potentiell}$ bei pH 8.2 wird in der Bodenklassifikation verwendet

$KAK_{effektiv}$ beim aktuellen Boden pH



Spezifische Adsorption

Wichtiges Beispiel:

Spezifische Adsorption von Phosphat Anionen an Oberflächen von Oxiden und Hydroxiden im Boden (z. B. an Goethit, FeOOH). Die Stärke der Phosphatadsorption an Oxide steigt mit abnehmendem pH Wert \Rightarrow in Sauren Böden wird **Phosphat** stark an Fe Oxide und Hydroxide **gebunden** und ist somit schlechter pflanzenverfügbar.

Weiteres Beispiel: Starke Bindung von Schwermetallen (z. B. Pb^{2+} , Cu^{2+}) an Oberflächen von Fe Oxiden und Hydroxiden und an die organische Substanz. Die Adsorption solcher Kationen sinkt mit abnehmendem pH Wert \Rightarrow Schwermetalle sind in sauren Böden mobiler und pflanzenverfügbarer, als in neutralen bis alkalischen Böden.

Makronährelement

Calcium (Ca)

Quellen

Bindungsformen

Quellen: Ist in vielen Gesteins als Haupt- oder Nebenbestandteil enthalten. In magmatischen Gesteinen (und entsprechend Metamorphiten) kommt Ca z. B. in Plagioklasen (Ca haltige Feldspäte), Pyroxenen und Amphiboten vor.

Bindungsformen: In Sedimentgesteinen (und entsprechenden Metamorphiten) ist Ca vorallem als Calcit (CaCO_3), Dolomit ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) oder Gips ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), vorhanden, oft als Hauptbestandteil (z. B. in Kalkstein oder Dolomit). Durch Verwitterung wird Ca^{2+} ausgewaschen oder an negative Oberflächen adsorbiert. Ca kann in tiefen Bodenhorizonten als Calcit ausfallen und dort zu Kalkanreicherung führen. Das austauschbare Ca ist gut pflanzenverfügbar, weil es schnell in die Bodenlösung hachgeliefert werden kann.

Makronährelement

Calcium (Ca)

Konzentrationen in Böden und Pflanzen

Entzüge

Düngungsformen

Konzentration: Ca-Sättigung am Kationenaustauscher in neutralen Böden >80% sinkt mit zunehmender Versauerung. Bodenlösung von landwirtschaftlichen Böden (gekalkt) häufig 40 - 160 mg/l Ca. In stark sauren Böden nur 1 - 5%, Bodenlösung <0.1 - 5 mg/l Ca. Pflanzen enthalten zwischen 0.5 und 50g Ca pro kg Trockensubstanz.

Entzüge: Ca Mangel kommt in stark versauerten Böden vor, ausnahmen bei empfindlichen Kulturen. Ca wird nur im Xylem nicht im Phloem transportiert \Rightarrow Stippigkeit (Ca Mangel Erscheinung) bei wenig transpirierende Pflanzenteilen (Früchte).

Düngung: Kalk (CaCO_3), Gips ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, besser löslich als Kalk), Superphosphat (CaHPO_4),...

Makronährelement

Magnesium (Mg)

Quellen

Bindungsformen

Quellen/Bindungsformen: Ist ein struktureller Bestandteil von verschiedenen Silikaten wie z. B. Biotite, Pyroxene, Amphibole, Olivine, . . . und ist damit in magmatischen Gesteinen enthalten. Basische Gesteine enthalten wesentlich mehr Mg als saure Gesteine. Sedimente enthalten in Unterschiedlichen Mengen Mg, sandige sind meist Mg-ärmer als tonige. In ultrabasischen Gesteinen Dolomit ($\text{MgCa}(\text{CO}_3)_2$) ist Mg Hauptbestandteil.

Herauslösung: Durch Verwitterung wird Mg^{2+} aus den Mineralien herausgelöst ausgewaschen oder an negative Oberflächen adsorbiert (etwas schwächer als Ca). Das austauschbare Mg ist gut pflanzenverfügbar, weil es schnell in die Bodenlösung nachgeliefert werden kann.

Makronährelement

Magnesium (Mg)

Konzentrationen in Böden und Pflanzen

Entzüge

Düngungsformen

Konzentration: Mg-Sättigung am Kationenaustauscher in landwirtschaftlichen oft zwischen 5% und 25% (15% gelten als optimal). Die Bodenlösung enthält 0.1 - 60 mg/l Mg. In stark versauerte Waldböden 0.1 bis 1% Mg Magelsymptome treten auf.

Düngung: Kieserti ($\text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$) Mg-haltige NPK Dünger leicht löslich, Dolomit ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) schwer löslich

Makronährelement

Kalium (K)

Quellen

Bindungsformen

Quellen/Bindungsformen: Ist struktureller Bestandteil von Glimmer (Biotit, Muskovit), Illiten, Alkalifeldspäten in allen magmatischen Gesteinen in unterschiedlichen Mengen vorhanden. In Sedimentgesteinen kommt K vor allem als Bestandteil von Schichtsilikaten (Glimmer, Illite,...) vor.

Herauslösung: Im Laufe der Bodenentwicklung wird K^+ bei der Verwitterung aus den Mineralien herausgelöst und ausgewaschen (bis ins Meer), ein Teil wird adsorbiert oder in der Vegetationsdecke gespeichert.

Makronährelement

Kalium (K)

Konzentrationen in Böden und Pflanzen

Entzüge

Düngungsformen

Konzentration: K-Sättigung beträgt häufig 0.5 - 5 %, die Bodenlösung enthält 2 -20 mg/l K.

Entzüge: Vermikulite und randlich aufgeweitete Illite können K^+ sehr stark in Zwischenschichten binden (**K-Fixierung**), nicht mehr pflanzenverfügbar. Spielt nur in Böden mit hohen Illit- oder Vermikulitgehalt und geringem K-Gehalt ein Rolle. Düngen dieser Böden führt zur Erschöpfung der K-Fixierkapazität, weiteres K wird dann in leicht auswaschbarer Form gespeichert, aufgenommen oder ausgewaschen.

Düngung: Kalisalz (KCl), Kainit (KNO_3), Kalisulfat (K_2SO_4),...

Makronährelement

Phosphor (P)

Quellen

Bindungsformen

Quellen/Bindungsformen: Die meisten Gesteine enthalten zwischen, 0.05 und 0.3% P_2O_5 , vorwiegend in Form von Apatiten ($Ca_5(PO_4)_3(OH,F,CO_3)$). P liegt immer als Orthophosphat in der Oxidationsstufe +V vor.

Herauslösung: Bei Verwitterung wird es als PO_4^{3-} freigesetzt, liegt im Wasser als $H_2PO_4^-$ oder HPO_4^{2-} vor (ja nach pH). Phosphat wird von Mikroorganismen oder Pflanzen aufgenommen und in organische Verbindungen eingebaut, an Bodenpartikel adsorbiert, als Fe, Al, Ca Phosphate wieder ausgefällt oder in geringen Mengen ausgewaschen. Alte Böden (Tropen, Subtropen) weisen auf Grund von Auswaschung einen viel geringeren Gesamt-P-Gehalt auf als Junge. Zudem ist in tropischen Böden der P-Verfügbarkeit gering (Phosphat ist stark an Fe, Al Oxide gebunden oder in Oxide eingeschlossen (**okkludiertes Phosphat**)).

Makronährelement

Phosphor (P)

Konzentrationen in Böden und Pflanzen

Entzüge

Düngungsformen

Konzentration: <0.1% des gesamten P im Boden ist gelöst der Rest an Oberflächen adsorbiert, in organischen Substanzen eingebunden oder in der Bodenfestphase eingebunden. Bodenlösung enthält zwischen 0.001 und 5 mg/l P, in ungedüngten meistens <0.1 mg/l P

Entzüge: Orthophosphatanion (PO_4^{3-}) hat eine hohe Affinität zu Ca^{2+} , Fe^{3+} , $\text{Al}^{3+} \Rightarrow$ unter sauren Bedingungen: schwerlösliche Fe Phosphate (Strengit $\text{FePO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), Al-Phosphate (Variszit, $\text{AlPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$); unter reduzierenden Bedingungen: Fe(II)-Phosphate (Vivianit, $\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$); bei hohem pH: Ca-Phosphate \Rightarrow **P-Verfügbarkeit in Böden im mässig sauren pH Bereich (pH 5.5 - 6.0) ist am höchsten.**

Im Oberboden liegen 25 - 65% des gesamten P in organischen Bindungsformen vor, ca. 50% davon als Phytate (Salze des Phytins), Rest Phospholipide, Nukleotid-Phosphate, . . . Phytate sind schwerlöslich können durch das von Bakterien, Pilzen produzierte Enzym Phytase gespalten werden, wobei das Phosphat wieder pflanzenverfügbar wird.

Düngung: verschiedenen Ca-Phosphate, Ammoniumphosphat, organische Düngung (Mist Klärschlamm (ab 2006 verboten)), . . .

Makronährelement

Stickstoff (N)

Quellen

Bindungsformen

Konzentrationen in Böden und Pflanzen

Quellen: Im Gegensatz zu allen anderen Nährstoffelementen ist N nicht in den Gesteinen erhalten, muss aus anderen Quellen in den Boden eingebracht werden. Wichtigste Quellen Niederschlag und biologische N_2 -Fixierung durch freilebende und symbiontisch lebende Mikroorganismen. In der Landwirtschaft regelmäßige N-Düngung.

Konzentrationen in Böden und Pflanzen: Ackerböden enthalten oft 1 - 3 g/kg N, organische Böden (z. B. Niedermoore) oft deutlich mehr. N liegt im Boden zum überwiegenden Anteil in organisch gebundener Form vor (oft >90%), z. B. in Aminosäuren, Aminoazuckern, heterozyklischen Ringstrukturen in Huminstoffen,

Bindungsformen: Anorganisch in Form von Nitrat (NO_3^-), Ammonium (NH_4^+), beide sehr gut wasserlöslich, NH_4^+ wird (da positiv) an Kationenaustauscher wie Tonminerale gebunden, NO_3^- wird kaum absorbiert und deshalb leicht mit dem Sickerwasser ausgewaschen.

Makronährelement

Stickstoff (N)

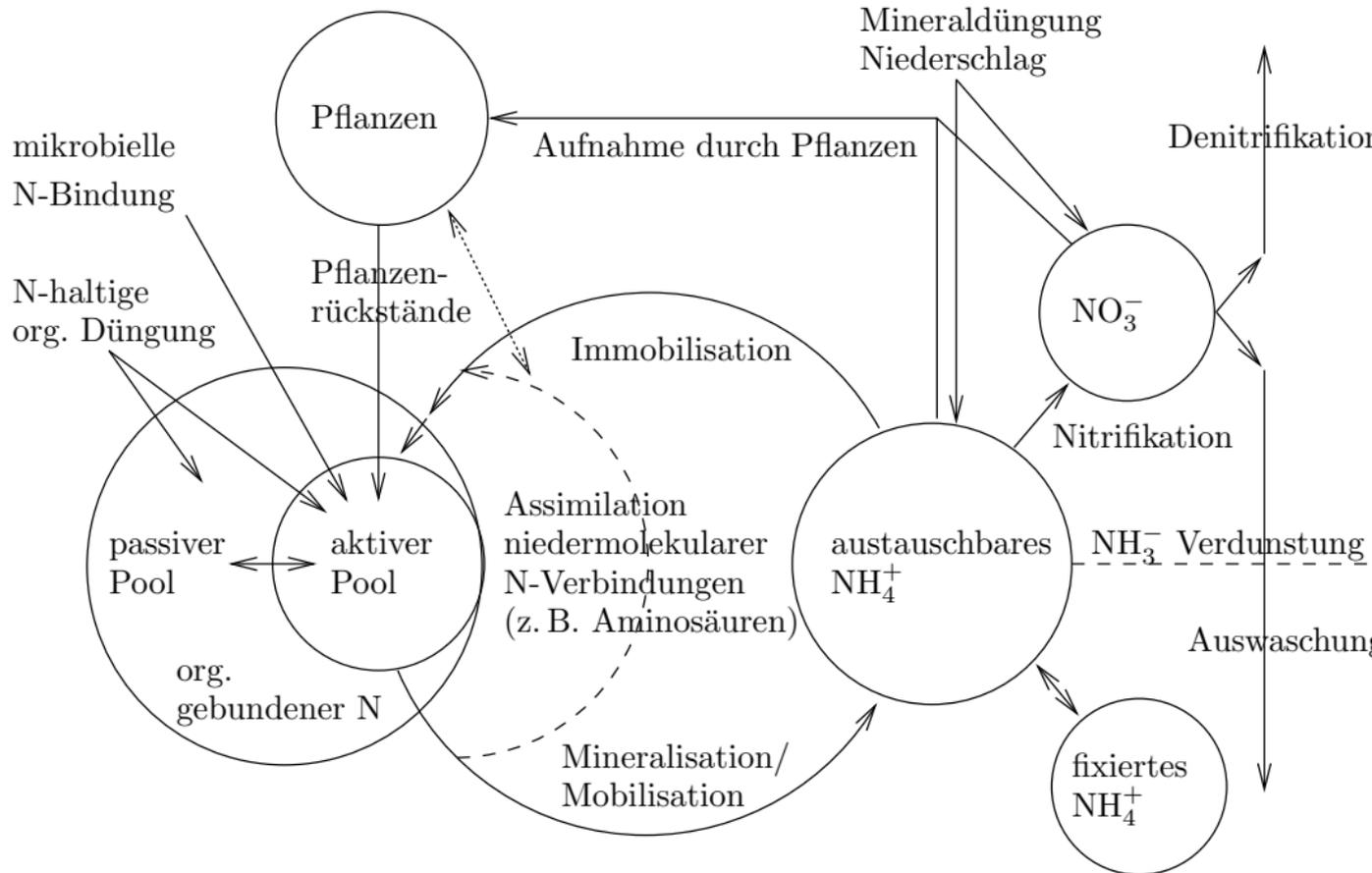
Weshalb ist der Stickstoffhaushalt von Böden wichtig?

- N ist ein stark ertragsbestimmendes Hauptnährelement und wird in der Landwirtschaft regelmässig gedüngt.
- Nitrat kann leicht ins Grundwasser ausgewaschen werden und die Trinkwasserqualität mindern.
- ein übermässiger N-Eintrag in Oberflächengewässer kann zur Eutrophierung führen.
- Gasförmige N-Verluste (N_2O , NH_3) haben negative Umwelteinflüsse. N_2O ist ein Treibhausgas und trägt zur Zerstörung der Ozonschicht bei. NH_3 führt zu erhöhten N-Einträgen in nicht landwirtschaftlich genutzte Ökosysteme und Gewässer.

Makronährelement

Stickstoff (N)

Umsetzungsprozesse im Boden (grafisch)



Makronährelement

Stickstoff (N)

Konzentrationen in Böden und Pflanzen

Biologische N₂-Fixierung

Verschieden Mikroorganismen könne mit Hilfe des Enzym Nitrogenase N_2 spalten und reduzieren und damit aus der Atomsphäre binden und in die organische NH_3 -Formen überführen.

Bakterien der Gattung Rhizobium (gehen mit Leguminosen eine Symbiose ein, Wurzelknöllchen). Maximale jährliche Fixierleistung:

Erbsen 120 kg N/ha

Ackerbohne 150 kg N/ha

Rotklee 170 kg N/ha

Luzerne 225 kg N/ha

weitere symbiontische Fixierung Strahlenpilze - Symbiose mit Erlen.

Neben symbiontischer Fixierung gibt es noch freilebende Mikroorganismen:

- Cyanobakterien (im Reisanbau wichtig)
- Azotobakter (aerob)
- Azotomonsa (aerob)
- Azospirillum (in Rhizosphäre von Gräsern)
- Clostridium (aerob)

Makronährelement

Stickstoff (N)

Mineralisierung (Mobilisation)

Bei der Mineralisierung durch heterotrophe Mikroorganismen (Bakterien, Pilze, Protozoen), die organische C-Verbindungen für den Energiegewinn und N für den Zellaufbau benötigen, wird N als NH_4^+ freigesetzt.

NH_4^+ geht in Bodenlösung und kann dort von Pflanzen aufgenommen werden, kann aber auch in Tonmineralien gebunden werden (NH_4^+ -Fixierung).

Bei hohem C/N Verhältnis der abgebauten organischen Substanzen wird NH_4^+ zunächst durch die Mikroorganismen selbst genutzt und dadurch in mikrobieller Biomasse immobilisiert (**N-Immobilisation**), später jedoch freigesetzt.

Makronährelement

Stickstoff (N)

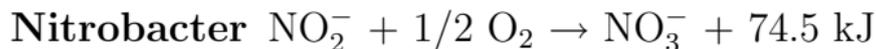
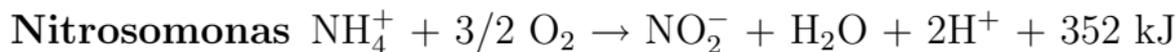
Nitrifikation

Die aerob autotroph lebenden Bakterien Nitrosomonas, Nitrobakter oxidieren N und wandeln so Ammonium (NH_4^+) in Nitrat (NO_3^-) um.



Bedingung ist Anwesenheit von $\text{O}_2 \Rightarrow$ bei schlechter Durchlüftung des Bodens gehemmt, niedriger pH und kühle Temperaturen hemmen ebenfalls \Rightarrow in schlecht durchlüfteten oder sauren Böden ist der Anteil an NH_4^+ -N am gesamten anorganischen N grösser als in gut durchlüfteten, neutralen Böden.

Nitrifikation läuft in zwei Teilschritten ab:



Makronährelement

Stickstoff (N)

Denitrifikation

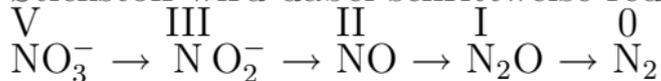
Reduktion zu Nitrat (NO_3^-), Nitrit (NO_2^-), zu gasförmigen Stickoxiden (NO_x), ;-)-Gas (N_2O), N_2 , die als Gase aus dem Boden entweichen.

Läuft vorwiegend biochemisch, teils auch chemisch ab.

Bei schlechter durchlüftung sinkt $p\text{O}_2$. Einige Mikroorganismen nutzen dann NO_3^- (als Elektronenakzeptor) zur Atmung.

Leicht verfügbare C-Verbindungen werden zur Energiegewinnung oxidiert.

Stickstoff wird dabei schrittweise reduziert.



Durch die Denitrifikation könne bis zu 30% der gesamten N-Düngung verloren gehen, vor allem in feuchten, schlecht durchlüfteten Böden.

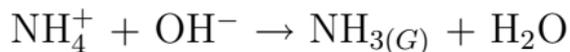
N_2O ist ein klimarelevantes Spurengas!

Makronährelement

Stickstoff (N)

Gasförmige Verluste (NH_3)

In neutralen bis alkalischen Böden ($\text{pH} > 7$) kann es zu Ammoniakverlusten kommen.



Gülle enthält häufig 50-70% des gesamten N als NH_4^+ .

NH_4^+ Verluste können durch Ausbringtechnik verringert werden z. B. direkte Einarbeitung der Gülle in den Boden.

Makronährelement

Stickstoff (N)

Auswaschung

NO_3^- Auswaschung kann zu erheblichen N-Verlusten und zur Belastung des Grundwassers mit Nitrit führen.

Einflussfaktoren sind:

- Wasserspeichervermögen des Bodens
- Niederschlagsmenge und -verteilung
- Pflanzenbestand (N-Aufnahme, Transpiration)
- N-Gehalte, Düngung, Mineralisierung

Einarbeitung von Stroh (hohes C/N Verhältnis) kann die N-Auswaschung im Winter verringern (N wird durch Mikroorganismen immobilisiert).

Nitrat (NO_3^-) ist ein Anion, wird daher nur schwach adsorbiert und daher **leicht ausgewaschen**.

Ammoniak (NH_4^+) wird an Tonminerale und Huminstoffe adsorbiert (da Kation) und daher viel **weniger schnell ausgewaschen**.

Makronährelement

Stickstoff (N)

Düngungsformen

Düngung: NO_3^- , NH_4^+ Salz, Harnstoff, Ammoniak, organische Dünger
(Mist, Gülle, ...)

Makronährelement

Schwefel (S)

Quellen

Bindungsformen

Quellen Schwefel ist in Magmatiten vor allem in Form von Sulfiden (von Fe, Zn, Pb, Cu, Hg, Ni, Ag) enthalten (0.2 - 3 g/kg S).

Sedimentgesteine (und Böden daraus) enthalten ja nach Entstehung unterschiedlich viel S als Sulfate (z. B. Gips $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) oder Sulfide (z. B. Pyrit, FeS).

Eintrag über die Atmosphäre ist eine wichtige S-Quelle (Vulkanausbrüche, Verbrennung von S-haltiger Kohle, ...). Die Verbrennung von S-haltigen Brennstoffen hat zu hohen SO_4^{2-} -Einträgen geführt \Rightarrow Bodenversauerung (H_2SO_4 im saurem Regen).

Herauslösung: Bei der Bodenbildung oxidieren die Sulfide und S wird als Sulfat (SO_4^{2-}) freigesetzt.

Bindungsformen: 60 - 98% des S in organischen Bindungsformen,

Mineralische S-Formen: Sulfate, Sulfide

Sulfide

Sulfate

$-II$

VI

S

\longleftrightarrow

S

anaerobe Bedingungen

aerobe Bedingungen

Makronährelement

Schwefel (S)

Konzentrationen in Böden und Pflanzen

Entzüge

Düngungsformen

Konzentrationen in Böden und Pflanzen: Mineralböden 0.1 - 0.5 g/kg S, Moore bis 10 g/kg S, Sulfatsaure Marschen bis 35 g/kg S. Böden auf Gipsstein viel höhere Gehalte.

Pflanzen: 1-15 g/kg Trockensubstanz

Entzug: 15-45 kg S/ha

Düngung: $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (Gips), K_2SO_4 , $\text{MgSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (Kieserit),...

Ziele der landwirtschaftlichen Pflanzenproduktion und deren Beeinflussung

Ziele

- hohe Erträge
- gute Qualität der Erzeugnisse
- gesunde Nahrungsmittel/Futtermittel
- Vermeidung von Umweltschäden

Alle diese Ziele werden durch Nährstoffgehalte im Boden beeinflusst:

- Nährstoffmangel kann den Ertrag vermindern
- Nährstoffüberschuss kann Mängel von anderen Nährstoffen induzieren (z. B. durch Aufnahmekonkurrenz zwischen K und Mg)
- Zu hohe Nährstoffgehalte können die Qualität vermindern (z. B. zu hohe N-Gehalte in Zuckerrüben senkt die Zuckerausbeute), Anfälligkeit gegen Schädlinge und Pflanzenkrankheiten erhöhen (z. B. zu hohe N Gehalte im Getreide können Blattlaus- und/oder Pilzbefall fördern).
- Hohe Nährstoffgehalte \Rightarrow verstärkte Auswaschung \Rightarrow Gewässereutrophierung, Trinkwasserbelastung (vor allem P und N).

Düngungsarten und ihre Ziele

Erhaltungsdüngung

Dient dem Ausgleich der Nährstoffbilanz.

Meliorationsdüngung

Dient der Erhöhung der verfügbaren Nährstoffvorräte im Boden.

Welche Voraussetzungen müssten erfüllt sein um eine optimale Düngung zu erreichen?

Man müsste...

- ...die **Nährstoffbilanz** auf jedem Feld eines landwirtschaftlichen Betriebes kennen.
- ...die **Nährstoffvorräte** und die **Verfügbarkeiten** der Nährstoffe in den jeweiligen Böden abschätzen können.
- ...den **Bedarf** der angebauten Kulturpflanzen im Verlaufe der Vegetationsperiode kennen.
- die optimale **Düngerform**, **zeitliche Verteilung** und **Ausbringungstechnik** wählen.

Ermittlung von Nährstoffbilanzen

Ermittlung einer genauen Nährstoffbilanz ist sehr aufwändig (grosse Zahl an Messungen und Analysen). In der Landwirtschaft oft Abschätzungen (Faustzahlen und vorhandene Analysen).

Es sollte versucht werden eine Nährstoffbilanz so gut als möglich zu erstellen, bevor man einen Düngungsplan erstellt.

Mögliche Quellen für pflanzenverfügbare Nährstoffe

- Nachlieferung aus Gesteinen (z. B. Ca, K, Mg, P, S)
- Atmosphärische Deposition (z. B. S, N)
- Anlieferung mit dem Grundwasser (z. B. Ca, Mg, N)
- Biologische N_2 -Fixierung (N)
- Düngung (mineralisch, organisch)

Mögliche Nährstoffentzüge

- Pflanzenwachstum und Abfuhr (Ernte)
- Auswaschung (z. B. NO_3^- -N, Ca, Mg, Cl)
- Bodenerosion (z. B. P)
- Immobilisierung durch starke Sorption oder Ausfällung (z. B. K, P)
- Gasförmige Verluste (z. B. N_2 , N_2O , NH_3)

Nährstoffvorräte

Verfügbarkeit und Bedarf

Bestimmung der pflanzenverfügbaren Nährstoffe

Der Gesamtgehalt kann durch chemische Analyse leicht bestimmt werden. Die Bestimmung der **pflanzenverfügbaren** und **nachlieferbaren** (im Laufe der Vegetationsperiode) ist extrem schwierig (selektive Extraktion wäre notwendig).

Dazu kommt das viele Pflanzen die chemischen Bedingungen im wurzelnahem Boden (**Rhizosphäre**) aktiv verändern um gezielt Nährstoffe zu mobilisieren, z. B. Ausscheidung von **Citrat** durch Lupinen (bei P-Mangel), **Phytosiderophoren** durch Gräser (sehr spezifische Liganden für Fe).

In der Praxis wird mit einem geeigneten Extraktionsmittel (z. B. Wasser, Salzlösungen (z. B. CaCl_2 , NH_4Cl), Säuren (z. B. HNO_3), Komplexbildnern (EDTA, DTPA), gemischte Extraktionslösungen (z. B. $\text{CaCl}_2/\text{DTPA}$)) extrahiert und der Nährstoffgehalt im Extrakt gemessen. Daraus wird die Menge an extrahierbaren Nährstoffen/ha im Hauptwurzelraum errechnet, dient als Mass für die verfügbare Menge an Nährstoffen.

Optimierung mittels **Nährstoff-Ertragsbeziehung**, berücksichtigt den Nährstoffbedarf und die Nährstoffaneignungsfähigkeiten einer bestimmten Kulturpflanze (Ermittlung ist sehr aufwendig).

Probleme bei der Ermittlung der Nährstoffgehalte auf einer Fläche

Gründe dafür (Übersicht)

- Heterogenität des Feldes
- Wurzelraum
- Wurzelausscheidungen
- Mikrobielle Aktivität im Wurzelraum

Probleme bei der Ermittlung der Nährstoffgehalte auf einer Fläche

Heterogenität des Feldes

Heterogenität des Feldes → wie macht man eine optimale Probennahme?

Übliche Probenahme: 0 - 40 cm Tiefe auf Ackerböden, 0 - 10 cm Tiefe auf Grünland, mindestens 20 Proben pro ha → Mischprobe → Labor

Probleme bei der Ermittlung der Nährstoffgehalte auf einer Fläche

Wurzelraum

Verschiedene Pflanzen haben unterschiedliche Wurzelsysteme (Fähigkeit den Boden zu durchwurzeln (z. B. wenn der Boden verdichtet oder sauerstoffarm ist)).

Durchschnittswerte für die Durchwurzelungstiefe:

Gräser	bis	30	-	50	cm
Getreide	bis	100	-	150	cm
Luzerne	bis			300	cm
Waldbäume	bis			500	

Pflanzen nehmen daher auch dem Unterboden erhebliche Mengen an Nährstoffen auf (bis 60% für einige Nährstoffe), so dass eine Bestimmung der Nährstoffe im Oberboden allein oft keine sehr genaue Einschätzung erlaubt.

Probleme bei der Ermittlung der Nährstoffgehalte auf einer Fläche Wurzelausscheidungen

Wurzelausscheidungen

Pflanzen geben auch Stoffe ab (zum Teil gezielt als Reaktion auf Nährstoffmangel):

- $\text{CO}_{2(g)}$
- H^+ oder HCO_3^- (zum Ladungsausgleich bei NH_4^+ oder NO_3^- Ernährung)
- niedermolekulare organische Säuren (z. B. zur P-Mobilisierung)
- Mucilage (Schleimstoffe an den Wurzelspitzen, als Schutz)
- Phytosiderophore (spezifische Liganden zur Mobilisierung von Fe)

Dadurch können Pflanzen aktiv die Nachlieferung von Nährstoffen beeinflussen, z. B. durch beschleunigte Auflösung von Mineralien in der Rhizosphäre.

Probleme bei der Ermittlung der Nährstoffgehalte auf einer Fläche

Mikrobielle Aktivität im Wurzelraum

Mikroorganismen in der Rhizosphäre können zur Mobilisierung von Nährstoffen beitragen. Die Mikroorganismen nutzen Wurzelausscheidungen als C-Quelle und tragen so zur Mineralisierung von Nährstoffen bei, ebenso können sie P aus dem Gestein mobilisieren (steht nach ihrem Absterben den Pflanzen zur Verfügung).

Mykorrhiza bilden Symbiosen mit Pflanzen (Kohlehydrate von, dafür P, Zn, . . . an Pflanzen). Der Pilz kann mit seinen Hyphen in sehr kleine Poren im Boden eindringen (grosses Bodenvolumen kann erschlossen werden).

Anlieferung von Nährstoffen zur Wurzel

Massenfluss mit dem Wasser, das die Pflanze aufnimmt

Interzeption d. h. hineinwachsen und direkter Kontakt der Wurzel mit dem Boden

Diffusion von Nährstoffen als Folge der Verarmung der Bodenlösung in der Rhizosphäre durch aktive Aufnahme in die Wurzel.

Die 3 Mechanismen sind für verschiedene Nährstoffe unterschiedlich wichtig, je nach wie hoch die Konzentration in der Bodenlösung und der Bedarf der Pflanzen ist.

Für Ca, N überwiegt Massenfluss, für P, K die Diffusion durch Verarmung der Rhizosphäre.

Bei Ca kommt es vor, dass mehr mit dem Massenfluss angeliefert als die Wurzel aufnehmen \Rightarrow Anreicherung in der Rhizosphäre \Rightarrow Kalkausfällungen entlang der Wurzeln.

Gründe für den Rückgang der Bodenfruchtbarkeit

Die Zerstörung oder Rückgang der Bodenfruchtbarkeit ist in vielen Regionen der Erde eines der grössten Umweltprobleme. Gründe hierfür:

- Versalzung
- Erosion
- Versiegelung
- Verdichtung
- Versauerung
- Überdünung
- Verarmung von Böden
- Kontamination

Gleichzeitig führt eine Intensivierung der Landwirtschaft bzw. Umstellung der Landnutzungssysteme zu einer Beschleunigung der Degradierung von Böden.

Bodenerosion

Allgemein

Unter Erosion versteht man den lateralen Abtransport von Bodenmaterial, an der Bodenoberfläche durch Wind oder Wasser.

Unter natürlichen Bedingungen ist die Erosionsrate gering.

Entscheidend ist die Reliefposition, Niederschlagsverteilung, Bodenbedeckung mit Vegetation, Art der Vegetation, Wasserinfiltration in den Boden.

Durch menschliche Tätigkeiten (z. B. Rodung von Wäldern) kann die Erosion stark/katastrophal gefördert werden.

Wassererosion

Formen der Wassererosion

Verschieden Formen von Erosion (je nach Schäden):

- Flächenerosion: flächenhafter Bodenabtrag
- Rillenerosion: Wasser erodiert schmale Rillen in den Boden
- Grabenerosion: grosse, oft mehrere Meter tiefe Erosionsgräben werden gebildet

Wassererosion

Folgen der Wassererosion

- Umverteilung von Wasser, wo es abfließt fehlt es später wo es hinfließt führt es zu Überschwemmungen und Vernässung.
- Umverteilung von Bodenmaterial: Verschlammung, Verkrustung der Bodenoberfläche, schlechter Durchlüftung des Bodens, Erosionrinnen erschweren die Bearbeitung, Überdeckung der Pflanze, Verlandung von Entwässerungsgräben
- Ertragsverminderung durch Nährstoffverluste, Verschlammung (Wegschwemmung), Verkrustung, Schädigung der Keimlinge,...
- Offsite-Schäden: Eutrophierung von Gewässern (P-Eintrag), Verlandung von Stauseen, Kanälen, Verschmutzung von Strassen, Gebäuden bei Überschwemmungen.
- Lokal auch Nutzen von Erosion: fruchtbares Überschwemmungsgebiet, weil woanders Nährstoffreiche Stoffe erodiert werden (z. B. Nil, Po, Euphrat, Tigris), saure Nährstoffarme Oberböden werden wegerodiert (an Hängen in Ruanda).

Wassererosion

Weshalb findet Wassererosion überhaupt statt?

Es müssen zwei Bedingungen erfüllt sein:

- Es müssen sich Bodenpartikel aus dem Gefügeverband ablösen
- Die Bodenpartikel müssen über grössere Distanzen transportiert werden.

Ablösung erfolgt durch Luftsprengung, wenn Wasser in stark ausgetrocknete Bodenaggregate eindringt oder durch den Tröpfchenaufprall bei starken Regengüssen direkt auf die Bodenoberfläche. Wasser das oberflächlich schnell abfließt, kann weitere Partikel durch Scherkräfte ablösen und mitreißen, was zu einer Rillen- oder Grabenerosion führen kann.

Wassererosion

Abschätzung der Wassererosion?

Das Ausmass der Wassererosion auf einem Feld quantitativ zu bestimmen ist aufwändig und technisch schwierig. Modelle beruhen auf der Soil Loss Equation (USLE), Allgemeine Bodenabtragungsgleichung (ABAG) welche davon ausgeht das Bodenabtrag durch folgende Faktoren massgeblich bestimmt wird:

- Regenerosität (R-Faktor)
- Bodenerodierbarkeit (K-Faktor)
- Hangneigungsfaktor (S-Faktor)
- Hanglage (L-Faktor)
- Bodennutzung (C-Faktor)
- Kulturunabhängige Schutzmassnahmen (P-Faktor)

Diese Faktoren werden als Funktion von leicht messbaren Paramtere festgelegt und kalibriert (umfangreiche Feldmessungen notwendig). Der zu erwartende Bodenabtrag A [$\text{t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$]:

$$A = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P$$

Winderosion

Was führt zu Winderosion?

Wenn die Windgeschwindigkeit 30 cm über Boden mehr als 4 - 5 m/s beträgt, können Bodenpartikel aus dem Aggregatverbund gerissen werden. Feine Partikel (Ton, Schluff) werden über weite Strecken transportiert. Sandpartikel rollen oder hüpfen über die Bodenoberfläche (Schwerkraft zieht sie immer wieder nach unten), auch **Saltation** genannt. Die Sandpartikel könne bei jedem Aufprall neue Bodenpartikel ablösen und so die Winderosion verstärken, sie können auch die Pflanzen beschädigen oder überdecken.

Winderosion

Steuergrößen der Winderosion

Windgeschwindigkeit knapp über der Bodenoberfläche Hängt primär vom Klima und Relief ab. Vegetation hat grossen Einfluss: in ausgeräumten Agrarlandschaften wird der Wind weniger gebrochen (fehlende Windschutzhecken, wenig Wald)

Feldlänge Durch Saltation verstärkt sich die Erosion mit zunehmender Transportlänge der Partikel, wechselnde Bodenbedeckung führt immer wieder zum Erliegen der saltierenden Partikel.

Bodenart und Feuchte Trockene, humusreiche, feinsandige Böden sind am anfälligsten. Wasser hält feine Bodenpartikel durch Kapillarkräfte zusammen. Humusreiche Bodenpartikel sind leicht. Tonarme Aggregate feinsandiger Böden zerfallen leicht durch Saltation werden weitere Partikel abgelöst.

Bodenbedeckung und Rauigkeit Rauhe Bodenoberfläche bremst den Wind nahe an der Oberfläche, besonders wirkungsvoll Bodenabdeckung durch Vegetation (bremst Wind, verhindert schnelle Austrocknung), teildruchlässige Windschutzhecken (bremsen den Wind ab)

Bodenerosion

Wie kann man Bodenerosion verhindern?

Wassererosion

- Bodenbedeckung (Pflanzenbestand, Mulch (organisches Material zu Abdeckung), Ernterückstände)
- Bodenbearbeitung und Einsaat quer zum Hang
- Förderung der Aggregatstabilität (durch organische Düngung)
- Vermeidung von Bodenverdichtung
- Terrassierung von steilen Hängen

Winderosion

- Bodenbedeckung (Pflanzenbestand, Mulch (organisches Material zu Abdeckung), Ernterückstände)
- Windschutzhecken
- Kleine Felder (→ häufiger Wechsel der angebauten Kultur)

Bodenverdichtung

Ursachen

Wirkung

Ursachen

Unbeabsichtigt Befahren des Bodens mit schweren landwirtschaftlichen Maschinen bei zu hoher Bodenfeuchtigkeit kann zu erheblichen Bodenverdichtung bis in den Unterboden führen (z. B. Zuckerrübensvollernter oft im Herbst bei feuchten Witterungsbedingungen) oder auch mit anderen Maschinen (Gasleitungsbau).

Beabsichtigt Beim Bau von Gebäude und Strassen wird der Boden mit Maschinen (Druck (Walzen), Vibration (Stampfer), Kombination (Vibrationswalzen)) verdichtet um ihn tragfähiger zu machen, dabei werden die mit Luft und Wasser gefüllten Porenräume verringert.

Wirkung Besonders schwerwiegend ist eine Verdichtung des Unterbodens da diese nicht reversibel ist. Der Oberboden kann immer wieder aufgelockert werden, dies ist im Unterboden problematisch. Porosität des Boden wird verringert, vor allem der Anteil an groben Poren, die für den Lufthaushalt und die Wasserversickerung wichtig sind. \Rightarrow hydraulische Leitfähigkeit sinkt, schlechte Durchwurzelbarkeit, verstärkter Oberflächenabfluss (\rightarrow Erosion), Sauerstoffmangel, N-Verlust durch Denitrifikation

Bodenverdichtung

Gegenmassnahmen

Gegenmassnahmen

- Befahren des Bodens nur bei ausreichender Tragfähigkeit (Abhängig von Bodenart und Feuchte), Vermeidung von schweren Maschinen, Einsatz von breiten Niederdruckreifen (gilt auch für Carchauffeure)
- Vermeidung von unnötiger Bebauung und Versiegelung von intakten Böden, effiziente Raumplanung, Umnutzung von Industriebrachen als Bauland,

Bodenversalzung

Natürliche Ursachen der Versalzung

Natürliche Versalzung in ariden und semiariden Klimazonen

wenig Wasserversickerung, daher Akkumulation von Salzen aus der Atmosphäre (Tagwasserversalzung)

hohe Evapotranspiration, daher auch Oberflächengewässer und Grundwasser oft erhöhte Salzgehalte

vorwiegend Salze von Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , CO_3^{2-} , NO_3^-

oft auch erhöhte Konzentrationen an B, Sr, Li, Rb, F, Mo, Ba

Atmosphärische Einträge von Salzen

küstennahe Gebiete: $100 - 2000 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$

trockene küstenferne Gebiete: $10 - 20 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$

Bodenversalzung

Anthropogene Ursachen der Versalzung

Versalzung durch falsche Bewässerung

- Bewässerung mit salzreichem Wasser
- magelhafte Drainage, hohe Evapotranspiration
- besonders in semiariden oder ariden Gebieten, aber manchmal auch in humiden Gebieten ein Problem!

Versalzung durch Grundwassereinfluss

Böden mit hoch anstehendem salzreichem Grundwasser können versalzen. Küstennahe Regionen in denen das Grundwasser mit dem Meer in Kontakt ist (z. B. als Folge einer zu starken Grundwasserentnahme)

Andere Salzeinträge

Streusalze: hauptsächlich NaCl

→ Vegetationsschäden an Strassenrändern (verzögerter Blattaustrieb, vorzeitiger Laubabfall, Extremfall Absterben von Pflanze)

→ hohe Na^+ Sättigung und hohe Salzkonzentration in Strassenrandböden (saline sodic), wenn Salze ausgewaschen werden neigen die Böden zu Dispergierung und Verschlämmung (sodic).

Salinität Sodicität

Unterteilung nach Salzgehalt und austauschbaren Kationen:

Saline • hohe Konzentration an leicht löslichen Salzen ($EC > 4 \text{ dS m}^{-1}$ (Leitfähigkeit)) • Na^+ Sättigung $< 15\%$ → hohe Salzkonzentration in der Bodenlösung ist ein Problem für das Pflanzenwachstum (Chloride, Sulfate, Nitrate).

→ Neigen auf Grund der hohen Salzkonzentration nicht zu Dispergierung (???). Die Wasserdurchlässigkeit ist relativ gut.

Sodic • hohe Na^+ Sättigung $> 15\%$ • geringe Konzentration an leicht löslichen Salzen ($EC < 4 \text{ dS m}^{-1}$) • pH 8.5 - 10

→ Neigen auf Grund der hohen Na^+ -Sättigung bei gleichzeitig geringer Salzkonzentration sehr stark zur Dispergierung. Folge: dichte Unterböden, instabile Bodenstruktur, gehemmte Wassersickerung.

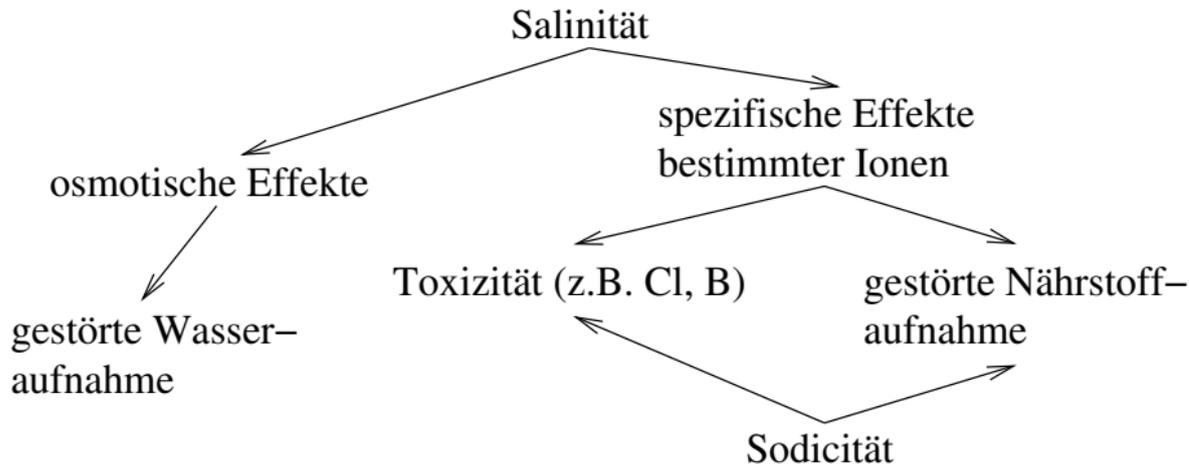
Saline-Sodic • hohe Konzentration an leicht löslichen Salzen ($EC > 4 \text{ dS m}^{-1}$) • hohe Na^+ Sättigung $> 15\%$ • pH < 8.5

→ Neigen auf Grund der Salzkonzentration nicht zur Dispergierung.

Wasserdurchlässigkeit relativ gut. Aber: wenn Salze ausgewaschen werden, entstehen **sodic** Böden, mit der Gefahr zu **dispergieren** (auseinanderfallen der Bodenpartikel) → Durchlässigkeit sinkt stark!

Wirkung der Versalzung

Im Extremfall wird der Boden für die Landwirtschaft unbrauchbar (nur noch Halophyten können wachsen). Eine Melioration („Verbesserung“) von versalzten Böden ist meist nicht möglich: Wassermangel, schlechter Drainage, hohen Kosten,...



Vermeidung von Versalzung im Bewässerungslandbau

- Vermeidung von salzreichen Wasser zur Bewässerung
- Bewässerung muss an den Salzgehalt des Wassers angepasst werden: genug bewässern, damit Salze immer wieder ausgewaschen werden!
- auf gute Drainage achten!
- Alternative: Tröpfchenbewässerung

Bodenversauerung und Bodenkontamination

Einträge von Säuren (HNO_3 , H_2SO_4), Schadstoffen (Schwermetalle: Pd, Cd), Radionuklide (^{137}Cs), organische Verbindungen (PAK, PCBs, Pestizide) führen zu einer chemischen Belastung. Die Quellen können Punktquellen (lokaler Eintrag) oder diffuse Quellen (grossflächiger Eintrag) sein.

Einige Schadstoffe sind sehr persistent (oder nicht abbaubar), reichern sich an (z. B. Schwermetalle), andere werden durch Mikroorganismen abgebaut (z. B. viele Pestizide) oder in organische Substanz des Bodens eingebaut (gebundene Rückstände).

Säureeintrag (saurer Regen) führt zu beschleunigter, verstärkter Bodenversauerung, landwirtschaftliche Flächen werden zum Ausgleich gekalkt, forstlich genutzte Böden in der Regeln nicht \Rightarrow je nach Boden starke Versauerung

Versiegelung

Bedeckung des Bodens mit **undurchlässigen Schichten** (Teer, Beton, Gebäude) unterbindet die Wasserinfiltration und den Gasaustausch \Rightarrow **verlieren Funktion** wie Lebensraum für Organismen, Filter für Grundwasserspender. Der Regen fließt von solche Flächen sehr schnell über die Kanalisation in die Flüsse \Rightarrow Hochwasserspitzen und Überschwemmungen in Regenperioden.

Derzeit sind $\approx 3\%$ der Gesamtfläche der Schweiz versiegelt. In Ballungsgebieten wesentlich höher, 53% der Siedlungsfläche gelten als versiegelt.

Böden und Klimawandel

Böden im globalem C-Kreislauf

Böden und darauf wachsende Vegetation (z. B. Wald) sind ein bedeutender C-Speicher im globalen C-Kreislauf. Jede Nutzungsänderung kann zu einer Erhöhung der C-Speicherung (\rightarrow CO₂-Senke) oder zu einer Freisetzung führen (\rightarrow CO₂-Quelle). CO₂-Senken könne von den Emissionen abgezogen werden (nach Kyoto-Protokoll, Vereinbarung von Bonn). Problematisch ist, dass im Moment CO₂-Senken und Quellen noch nicht richtig quantifiziert werden können.

Auch weiss man wenig darüber wie sich terrestrische Ökosysteme unter verändertem Klima verhalten werden.

Genauere Auseinandersetzung mit der Dynamik organischer Substanz im Boden ist nötig.

Dynamik der Organischen Substanz

Allgemein, Quellen

Generell: organische Substanz wird angereichert wenn Zufuhr (Z) grösser als Abfuhr (A) $\Delta C = Z - A$.

Wenn ΔC positiv CO₂-Senke, sonst Quelle.

Der Abbau der organischen Substanz (A) wird von vielen Einflussfaktoren gesteuert, die wiederum zum teil nicht unabhängig voneinander sind:

- Zusammensetzung der Streustoffe
- Bodentemperatur
- Bodenfeuchte
- Durchlüftung
- Boden pH Wert und Nährstoffgehalt
- Einmischung und Zerkleinerung durch Bodentiere
- Aktivität von Bakterien und Pilzen

Quantitative Vorhersage des Abbaus von organischen Substanzen im Boden ist auf Grund der Komplexität momentan nicht möglich. Man kann aber generelle Trends beobachten und die Folgen von Veränderung oder Eingriffen abschätzen

In der Landwirtschaft spielt die Dynamik der organischen Substanz eine zentrale Rolle für die Bodenfruchtbarkeit.

Massive Rodungen der Wälder (für Ackerbau) \Rightarrow Erosion, Förderung von Humusabbau. Drainieren (und damit belüften) von Niedermoorflächen oder andere nasse Böden \Rightarrow verstärkter Abbau von organischen Substanzen. \Rightarrow **Böden wurde zu einer wichtigen CO₂-Quelle.**

Dynamik der Organischen Substanz

Senken

Ackerböden enthalten deutlich weniger organische Substanz, als vergleichbare Böden unter Wald oder Grünland.

Durch Düngung, Drainage, Bodenbearbeitung werden optimale Abbaubedingungen geschaffen (leichtere Bodenbearbeitung, nächste Kultur nicht im Wachstum hindern und ihr die Nährstoffe wieder zur Verfügung stellen) \Rightarrow interessiert an einem möglichst hohem Umsatz an organischen Substanzen.

Starke Anreicherung: Vor allem wenn Streu Abbau gehemmt, gehemmte biologische Aktivität auf Grund von: • Schwer abbaubare Streu (Nadelhölzer, Eiche, Heidevegetation) • Nährstoffarmut (Böden auf Nährstoffarmen Gesteinen) • niedriger pH (stark versauerte Böden) • Sauerstoffmangel (sehr nasse Böden) • Kälte (alpine Standorte, Tundra, Steppe im Winter) • Trockenheit (Steppe im Sommer)

Anmoor, Niedermoor, Hochmoor: Hemmung des Abbaus durch Sauerstoffmangel infolge Vernässung, ausserdem sauer und Nährstoffarm.

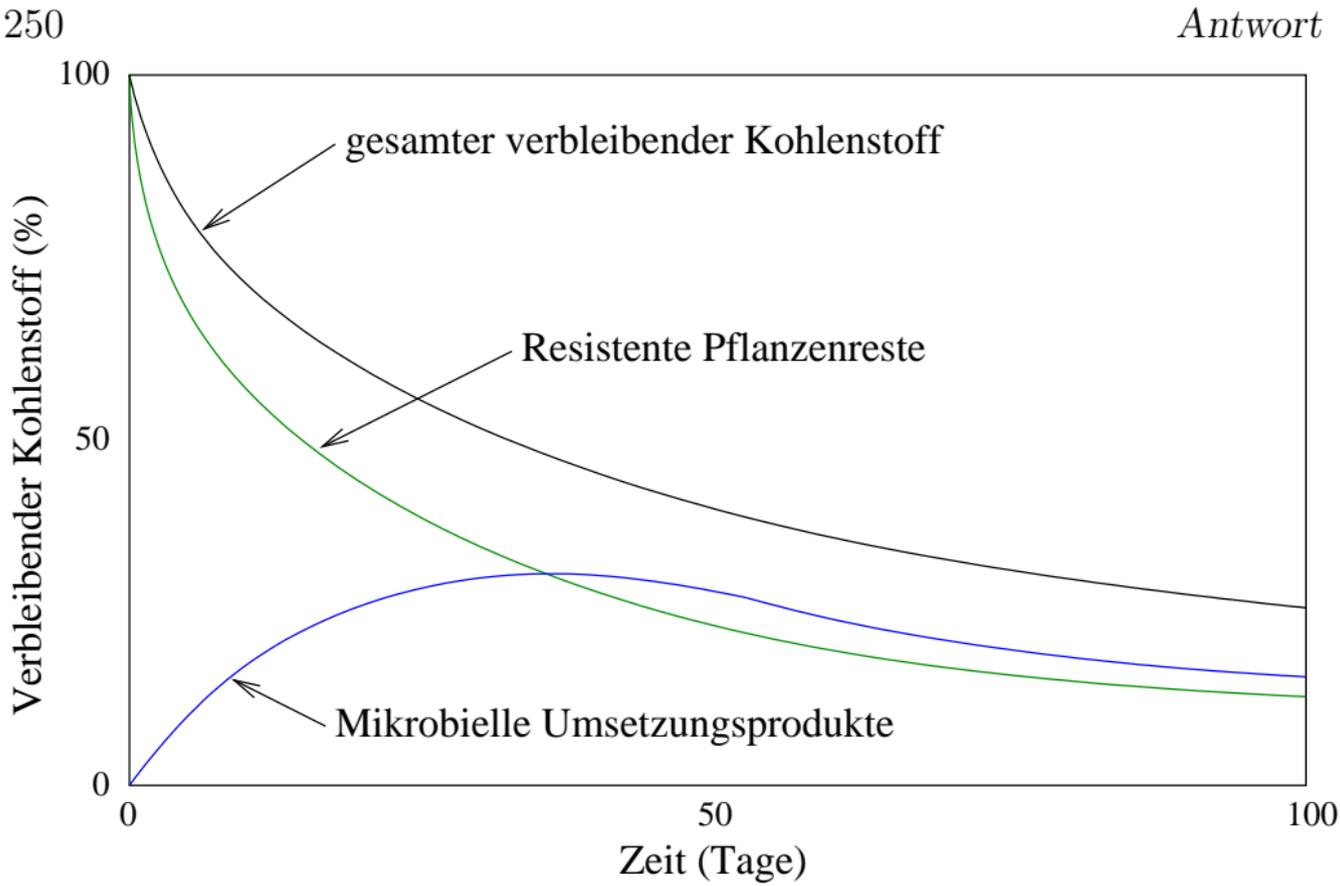
Podsol: niedriger pH, Nährstoffarmut, schwer abbaubarer Streu, fehlende Regenwürmer \Rightarrow Rohhumusauflage

Am meisten C-organisch ist in Böden der kühlen bis kalten humiden Zonen gespeichert, bei Klimaerwärmung könnten diese Böden Quellen werden (Zusammenhänge ungenügend erforscht).

Abbau von zugeführter organischer

Substanz

graphisch



Al-Toxizität

Glossar

Al kann für Pflanzenwurzeln toxisch sein und das Wurzelwachstum stark hemmen. Al-Toxizität kommt in stark sauren Mineralböden vor (pH₅), in denen die Al Konzentration in der Bodenlösung hoch bzw. das Ca/Al Verhältnis niedrig ist (kritischer Wert für Fichte: Ca/Al₁).

Amphibole

Glossar

Gruppe von Bandsilikaten, die vor allem in basischen magmatischen und metamorphen Gesteinen vorkommen. Das Gestein Amphibolit besteht zum grössten Teil aus Amphibolen. Beispiel: Hornblenden mit der Summenformel $\text{Ca}_2(\text{Mg},\text{Fe}^{2+})_4(\text{Al},\text{Fe}^{3+})\text{Si}_7\text{AlO}_{22}(\text{OH})_2$.

???

Antigorit

Glossar

Serpentinmineral mit der Summenformel $(\text{Mg,Fe})_3\text{SiO}_5(\text{OH})_4$.
Trioktaedrisches 1:1 Schichtsilikat, das gewellte Plättchen bildet
(Blätterserpentin).

Basalte

Glossar

Basische Silikatgesteine, mit feiner Textur. In Basalten sind die wichtigsten Mineralien → Olivine, → Amphibole, → Pyroxene, → Feldspäte (Ca-reiche Plagioklase).

Biotit

Glossar

Dunkler, leicht verwitterbarer → Glimmer, mit der Summenformel $\text{K}(\text{Mg}, \text{Fe}^{II})_3(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ (trioctaedrisch). Glimmer sind primäre 2:1 Schichtsilikate und sind neben Quarz und Feldspäten ein Hauptbestandteil von Graniten und Gneisen.
???

Bioturbation

Glossar

Vermischung des Bodens durch die Aktivität von Bodenorganismen, vor allem von Regenwürmern und Nagetieren.

Bodenart

Glossar

Einteilung der →Textur eines Bodens nach den prozentualen Anteilen von Ton, Schluff und Sand in der Feinerde. Beispiele für Bodenarten: lehmiger Sand, Lehm, toniger Lehm,...

Bodenstruktur

Glossar

Verbund und Anordnung von Bodenpartikeln im Raum. Man unterscheidet die Grundgefügearten Einzelkorn-, Kohärent- und Aggregatgefüge. Wichtige Aggregatgefüge sind z. B. Krümel-, Subpolyeder, Polyeder, Prismengefüge. Das Gefüge hat einen starken Einfluss auf die Durchlüftung, Wasseleitfähigkeit und Lagerungsdichte eines Bodens.

Braunerde

Glossar

Boden mit einem verbraunten Unterboden (kalkfrei, Bv Horizont). Sehr weit verbreiteter Bodentyp in Mitteleuropa, einschliesslich den Alpen.

Calcit

Glossar

Carbonatmineral mit der Summenformel CaCO_3 . Hauptbestandteil von vielen Sedimentgesteinen, insbesondere von Kalksteinen. Kommt auch in metamorphen Gesteinen und als sekundäre Ausfällung in Böden vor.

Calcium (Ca)

Glossar

Hauptnährelement, in Gesteinen struktureller Bestandteil von Carbonaten (\rightarrow Calcit, \rightarrow Dolomit) oder Silikaten (\rightarrow Feldspäte, \rightarrow Amphibole, \rightarrow Pyroxene). Bei der Verwitterung wird Ca^{2+} herausgelöst, welches austauschbar gebunden oder mit Sickerwasser ausgewaschen wird. Ca kann in tieferen Bodenhorizonten als sekundärer Calcit wieder ausfallen.

Ca/Mg-Verhältnis

Glossar

Ein zu niedriges Ca/Mg Verhältnis ist ungünstig für die meisten Pflanzen, weil die Ca-Aufnahme dadurch erschwert ist (siehe Böden auf Serpentin). Ein zu hohes Ca/Mg Verhältnis kann umgekehrt zu Mg Mangel führen.

C/N Verhältnis

Glossar

Ein hohes C/N Verhältnis ($C/N > 30$) in der Streu bedeutet, dass vor allem C-reiche aber N-arme Verbindungen vorhanden sind (z. B. Lignine, Cellulose, Wachse, Harze). Der Abbau durch Mikroorganismen ist erschwert und oft N-limitiert. Ein niedriges C/N Verhältnis ($C/N < 15$) bedeutet, dass mehr N-reiche Verbindungen vorhanden sind (z. B. Proteine, Aminosucker), die den Abbau begünstigen.

Chrom (Cr)

Glossar

Cr ist für Pflanzen nicht essentiell, aber für Menschen und Tiere ist Cr(III) ein essentielles Nährelement. Cr kommt in Boden in den Oxidationsstufen Cr(III) und Cr(VI) vor. Cr(III) ist wenig toxisch und im Boden immobil, weil es stark Fe(III) Hydroxide gebunden wird. Cr(VI) ist dagegen 100 - 1000 Mal toxischer als Cr(III) und im Boden viel mobiler, weil es als Anion vorliegt.

Chrysotil

Glossar

Serpentinmineral mit der Summenformel $\text{Mg}_3\text{SiO}_5(\text{OH})_4$. Trioktaedrisches 1:1 Schichtsilikat, das Fasern bildet, die aus aufgerollten Schichten bestehen. Die Fasern sind ca. 20 nm dick und oft mehrere mm lang (Faserserpentin, Faserasbest).

Denitrifikation

Glossar

Reduktion von Nitrat (NO_3^-) und Nitrit (NO_2^-) zu gasförmigem N_2 und Stickoxiden (NO_x , N_2O), vorwiegend durch Bodenbakterien (z. B. **Pseudomonas**). Unter anoxischen Bedingungen verwenden denitrifizierende Bakterien Nitrat als Elektronenakzeptor bei der Atmung.

Dolomit

Glossar

- Carbonatmineral mit der Summenformel $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$. Die Löslichkeit von Dolomit ist deutlich niedriger als diejenige von \rightarrow Calcit.
- Sedimentgesteine, die hauptsächlich aus dem Mineral Dolomit bestehen.

Eisen

Glossar

Mikronährelement, in Gesteinen struktureller Bestandteil von primären Silikaten, vor allem als Fe(II). Bei der Verwitterung wird Fe(II) freigesetzt und in belüfteten Böden zu Fe(III) oxidiert, welches schwerlösliche Hydroxide und Oxide bildet. Eisenhydroxide in alpinen Böden sind z. B. Goethit (α -FeOOH) und Ferrihydrit, ein schlecht kristallines Fe(III) Hydroxid. Siehe auch $\rightarrow \text{Fe}_d$ und $\rightarrow \text{Fe}_o$.

Epidot

Glossar

Sorosilikat mit der Summenformel $\text{Ca}_2(\text{Al,Fe})_3(\text{SiO}_4)_3(\text{OH})$. Farbe:
Flaschengrün.

Fe_d

Glossar

Dithionitlösliches Eisen. Dithionit ist ein starkes Reduktionsmittel, mit dem alle freien Eisenhydroxide und Oxide aufgelöst werden. Das Eisen, welches noch in Silikatstrukturen gebunden ist, wird dabei nicht extrahiert. Fe_d ist also ein Mass für den gesamten Gehalt an sekundären Eisenoxiden und Hydroxiden eines Bodens.

Feldkapazität (FK)

Glossar

Wasseervolumen, das ein Boden nach völliger Wassersättigung gegen die Schwerkraft speichern kann. Die FK nimmt mit der Körnung in der Reihenfolge Tone > Schluffe, Lehme > Sande ab.

Feldspäte

Glossar

Gruppe von Gerüstilikaten, in denen jeder zweite bzw. jeder vierte Tetraeder mit Al^{3+} statt mit Si^{4+} besetzt ist. Der Ladungsausgleich erfolgt durch Einbau von Na, K oder Ca ins Kristallgitter. Endglieder sind Albit ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$), Anorthit ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$) und Kalifeldspat (KAlSi_3O_8). Die Mischungsreihe zwischen Albit und Anorthit nennt man Plagioklase (Na-Ca Feldspat). Die Mischungsreihe zwischen Albit und Kalifeldspat nennt man Alkalifeldspäte (Na-K Feldspat).

Fe_o

Glossar

Oxalatlösliches Eisen. Mit Oxalat löst man alle schlecht kristallinen Eisenhydroxide, wie z. B. Ferrihydrit. Gut kristalline Eisenoxide, wie z. B. Goethit, werden nicht gelöst. Fe_O ist also ein Mass für den Gehalt an schlecht kristallinen Eisenhydroxiden im Boden. Das Verhältnis Fe_O/Fe_D wird oft als Mass für die Kristallinität der Eisenhydroxide interpretiert.

Fep

Glossar

Pyrophosphatlösliches Eisen. Mit Natriumpyrophosphat löst man Fe, das an organische Substanz komplexiert ist. Fe_p ist vor allem in Bh/Bs Horizonten von Podsolen sehr hoch.

Gefüge

Glossar

300

→ Bodenstruktur

Antwort

Girlanden

Glossar

Treppenförmiges Mikrorelief, das sich an Hanglagen durch Gefrieren und Auftauen von flachgründigen Böden (Rendzinen) aus Dolomit oder Kalkstein ausbilden kann.

Glimmer

Glossar

Gruppe von (primären) 2:1-Schichtsilikaten. Wichtige Beispiele sind → Biotit und → Muskovit. Glimmer sind neben Quarz und Feldspäten ein Hauptbestandteil von Graniten, Gneisen und Glimmerschiefern.

Gneis

Glossar

Metamorphes Silikatgestein, oft mit dunklen und hellen Bändern. In sauren Gneisen sind die wichtigsten Mineralien →Feldspäte, →Quarz und Glimmer (→Biotit, →Muskovit). Man unterscheidet Orthogneise (aus Magmatiten entstanden) und Paragneise (aus Sedimentiten entstanden).

Granate

Glossar

Gruppe von Inselsilikaten, die sehr hart und verwitterungsresistent sind (Nutzung als Edelstein). Beispiel: Almandin, $\text{Fe}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3$. Granate kommen als Nebenbestandteil in einigen metamorphen Gesteinen vor.

Huminstoffe

Glossar

Natürliche, durch mikrobielle Abbauprozesse entstandene organische Substanzen in Böden und Gewässern. Huminstoffe sind dunkel gefärbt und haben eine komplexe, nicht genau definierte chemische Struktur. Sie werden operationell unterteilt in Huminsäuren, Fulvosäuren und Humine (nach ihrer Löslichkeit in 0.1 M NaOH und HCl).

Humusformen

Glossar

Die Humusform beschreibt die Verteilung der organischen Substanz in organischen Auflagehorizonten (L, Of, Oh) und dem mineralischen Oberboden (Ah). Sie liefert Informationen über die Dynamik des Abbaus von Streu durch Tiere und Mikroorganismen. Die wichtigsten terrestrischen Humusformen sind →Mull, →Moder und →Rohhumus.

Hydromorphie

Glossar

Hydromorphe Merkmale (auch redoximorphe Merkmale) sind Fe-Rostflecken (rötlich-braun) und Mn-Konkretionen (schwarz). Sie bilden sich in Söden die permanent (durch Grundwasser) oder temporär (durch Stauwasser) venäsiert und dadurch schlecht durchlüftet sind. Unter O_2 Mangel kommt es zur mikrobiellen Reduktion von Fe^{3+} zu Fe^{2+} und von Mn^{4+}/Mn^{3+} zu Mn^{2+} . Fe^{2+} und Mn^{2+} Ionen sind gut wasserlöslich. Sie werden im Boden transportiert und an Stellen mit höherem Redoxpotential spontan wieder oxidiert und als Fe(III) hydroxid bzw. Mn(III/IV) hydroxid ausgefällt.

Kalium (K)

Glossar

Hauptnährelement, in Gesteinen struktureller Bestandteil von Feldspäten, Schichtsilikaten und anderen Mineralien. In Böden wird es durch Verwitterung freigesetzt und austauschbar an Tonmineralien adsorbiert.

Kationenaustauschkapazität (KAK)

Glossar

Die Summe an austauschbaren Kationen in einem Boden, in mmol Ladungen pro kg Boden (mmol_c/kg), nennt man die effektive KAK. Die wichtigsten Kationentauscher im Boden sind Tonminerale und Huminstoffe.

Kryoturbation

Glossar

Vermischung des Bodens durch regelmässiges Gefrieren und Auftauen (→Turbation). Bei starker Kyoturbation werden Steine mit der Zeit nach oben gepresst und bilden Steinringe an der Bodenoberfläche.

Lizardit

Glossar

Serpentinmineral mit der Summenformel $\text{Mg}_3\text{SiO}_5(\text{OH})_4$. Troktaedrisches 1:1 Schichtsilikat, das Plättchen bildet.

Magnesium (Mg)

Glossar

Hauptnährelement, in Gesteinen struktureller Bestandteil von verschiedenen Silikaten. Basische und ultrabasische Gesteine enthalten wesentlich mehr Mg als saure Gesteine. In \rightarrow Serpentinit und \rightarrow Dolomit kommt Mg sogar als Hauptbestandteil vor.

Moder

Glossar

Terrestrische Humusform auf sauren, mässig nährstoffarmen Böden mit einem Fermentierungshorizont und eher schwachen Aktivität von wühlenden Bodentieren. Der Oberboden besteht aus einem Streuhorizont (L), einem Fermentierungshorizont (Of), einem geringmächtigen Humifizierungshorizont (Oh) und einem mineralischen Oberbodenhorizont (Ah).

Mull

Glossar

Terrestrische Humusform auf neutralen bis schwach sauren, nährstoffreichen, gut durchlüfteten Böden, mit leicht zersetzbarer Streu und grosser biologischer Aktivität. Der Oberboden besteht aus einem Streuhorizont (L) über einem mineralischen Oberbodenhorizont (Ah). Warm-humides Klima begünstigt die Bildung von Mull.

Muskovit

Glossar

Heller, schwer verwitterbarer \rightarrow Glimmer, mit der Summenformel $\text{KAl}_2(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ (dioktaedrisch). K^+ in den Zwischenschichten wird nur sehr langsam pflanzenverfügbar.

nFK

Glossar

Nutzbare Feldkapazität, d. h. das Wasservolumen, das ein Boden gegen die Schwerkraft in pflanzenverfügbarer Form speichern kann. Den nicht pflanzenverfügbaren Anteil der gesamten →Feldkapazität nennt man Totwasser.

hügel Nickel (Ni)

Glossar

Mikronährelement, in den meisten Gesteinen nur in kleinen Konzentrationen vorhanden (<50 mg/kg). Serpentinite enthalten dagegen hohe Gehalte an Ni (bis 2000 mg/kg). In Böden aus Serpentinitt kann Ni toxisch für nicht angepasste Pflanzenarten sein.

Nitrifikation

Glossar

Biologische Oxidation von Ammonium-N (NH_4^+) zu Nitrit-N (NO_2^-) und Nitrat-N (NO_3^-). Nitrifikation führt zu einer Erhöhung der Bodenazidität, weil bei der Oxidation Protonen freigesetzt werden.

N-Mineralisation

Glossar

Organische N-Verbindungen werden durch Mikroorganismen abgebaut und N wird als NH_4^+ freigesetzt. NH_4^+ ist ein Kation und wird an Tonmineralien und Huminstoffe durch Kationenaustausch adsorbiert. In aeroben, nicht stark sauren Böden wird NH_4^+ durch Bakterien relativ schnell in Nitrat (NO_3^-) umgewandelt (\rightarrow Nitrifikation).

Olivine

Glossar

Gruppe von Mg/Fe Inselsilikaten, die vor allem in basischen und ultrabasischen Gesteinen als Hauptbestandteil vorkommen. Wichtige Vertreter sind Forsterit (Mg_2SiO_4) und Fayalit (Fe_2SiO_4). Im →Serpentinit wurden die Olivine grössten Teils in Serpentinmineralien umgewandelt.

Permafrost

Glossar

Ganzjähriger Bodenfrost, in den Alpen etwa ab 2700 m Höhe, vorkommend. Durch die Klimaerwärmung verschiebt sich die Permafrostgrenze in den Alpen nach oben.

Phosphor (P)

Glossar

Hauptnährelement, in Gesteinen vorwiegend als Apatit ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH},\text{F},\text{Cl})$) vorkommend. In Böden liegt P immer in der Oxidationsstufe +V vor (Phosphat, PO_4). Phosphat wird bei der Verwitterung freigesetzt, an Fe-Oxide spezifisch adsorbiert und zum Teil in organische P-Formen eingebaut. Die P-Verfügbarkeit ist im schwach sauren pH Bereich optimal. In stark sauren Böden bilden sich schwerlösliche Fe/Al-Phosphate, in kalkreichen Böden sind Ca-Phosphate (inklusive Apatit) schlecht löslich.

pH Wert des Bodens

Glossar

Der pH Wert eines Bodens ist entscheidend für die Verfügbarkeit von Nährstoffen sowie toxischen Elementen. Ideal für die meisten Pflanzen ist ein pH Wert im schwach bis mässig sauren Bereich (pH 5-7). In humiden Klimazonen liegen die pH Werte der Böden meistens zwischen pH 3 (sehr stark sauer) und pH 8 (schwach alkalisch). In ariden Gebieten sind auch stark alkalische Böden bis pH 10 möglich. Der Boden pH Wert wird im Labor in einer Suspension von 10 g Boden in 25 ml 0.01 M CaCl_2 Lösung gemessen.

Podsol

Glossar

Bodentyp mit gebleichtem Horizont unter einer sauren Rohhumusauflage, darunter sind →Huminstoffe (Bh) und Fe Oxide (Bs) wieder angereichert. Siehe auch →Podsolierung. .

Podsolierung

Glossar

Abwärtsverlagerung von gelösten organischen Substanzen mit komplexiertem Al und Fe in sauren, oft sandigen Böden, die sich im Unterboden anreichern. Podsolierung kommt v. a. unter Nadelwäldern und Heidevegetation vor (\rightarrow Podsol).

Pyroxene

Glossar

Gruppe von Kettensilikaten, die vor allem in basischen und ultrabasischen magmatischen und metamorphen Gesteinen vorkommen. Beispiele sind Augit $((\text{Ca},\text{Na})(\text{Mg},\text{Fe},\text{Al})(\text{Al},\text{Si})_2\text{O}_6)$ und Enstatit (MgSiO_3) .

Quarz

Glossar

Gerüstsilikat mit der Summenformel SiO_2 . Sehr verwitterungsresistent, kein isomorpher Ersatz. Hauptkomponente der Sand- und Schlufffraktionen vieler Böden. Hauptbestandteil vieler saurer Silikatgesteine (z. B. Granit, Diorit, Quarzit).

Rendzina

Glossar

Bodentyp mit einem gut entwickelten, humosen Oberboden (Ah) über Carbonatgestein, z. B. Dolomit. Rendzinen sind eher flachgründige Böden mit einem pH Wert im neutralen bis schwach alkalischen Bereich.

Rohhumus

Glossar

Terrestrische Humusform auf stark sauren, nährstoffarmen Böden mit wenig wühlenden Bodentieren. Es findet kaum Abbau der Streu statt, so dass es zu einer dicken organischen Auflage kommt. Der Oberboden besteht aus einem Streuhorizont (L), einem mächtigen Fermentierungshorizont (Of), einem mächtigen Humifizierungshorizont (Oh) und einem geringmächtigen mineralischen Oberbodenhorizont (Ah). Kühl-humides Klima begünstigt die Bildung von Rohhumus.

Schwefel (S)

Glossar

Hauptnährelement, in magmatischen Gesteinen vorwiegend als Sulfide vorkommend. Sedimentgesteine (und daraus entstandene Böden) enthalten je nach Entstehung unterschiedlich viel Sulfate (z. B. Gips, $\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$) oder Sulfide (z. B. Pyrit, FeS). über die Atmosphäre (saurer Regen) wird H_2SO_4 in die Böden eingetragen.

Serpentinit

Glossar

Ultrabasisches. metamorphes Gestein das vor allem aus Serpentinmineralien besteht (\rightarrow Chrysotil, \rightarrow Antigorit, \rightarrow Lizardit). In frischem Zustand durch Minerale der Serpentinegruppe dunkelgrün gefärbt, verfärbt sich aber bei Verwitterung gelblichbraun (hoher Eisen-Gehalt; Oxidation des Eisens).

Solifluktion

Glossar

Durch Wasserübersättigung verursachte, langsame Rutschung des Bodens an steileren Hängen, der wie eine zähe Masse ins Fließen gerät.

Stickstoff (N)

Glossar

Hauptnährelement, das für viele Pflanzen limitierend und in Gesteinen nicht enthalten ist. Die wichtigsten natürlichen Quellen sind der Eintrag über Niederschläge und die biologische N_2 -Fixierung. N wird von den Pflanzen als Ammonium (NH_4^+) oder Nitrat (NO_3^-) aufgenommen. Im Boden sind meistens über 90% des N in organischen Bindungsformen vorhanden. Dieses N wird erst durch \rightarrow N-Mineralisation pflanzenverfügbar.

Syrosem

Glossar

Sehr flachgründiger und schwach entwickelter Rohboden mit einem schwach ausgebildeten Oberboden (Ai) direkt über festem Gestein (C).

Tangelrendzina

Glossar

Bodentyp mit einer mächtigen, sauren Rohhumusauflage direkt über Carbonatgestein, z. B. Dolomit. Tangelrendzinen kommen nur an Schattigen, kalten Lagen in den Alpen vor.

Textur

Glossar

Größenverteilung der Feinerde (<2 mm), d. h. Anteile von Ton (<2 μm), Schluff (2 - 50 μm) und Sand (50 - 2000 μm). Synonym: Körnung.

Tonminerale

Glossar

Sekundäre Schichtsilikate, Partikel meistens $<2 \mu\text{m}$. Tonminerale machen in der Regel den grössten Teil der Tonfraktion von Böden aus. Sie haben eine grosse spezifische Oberfläche mit negativer Ladung und spielen deshalb eine wichtige Rolle beim \rightarrow Kationenaustausch und der Sorption von organischen Molekülen. Wichtige Gruppen von Tonmineralien sind Illite, Vermikulite, Smektite, Kaolinite und Chlorite.

Tonverlagerung

Glossar

Abwärtsverlagerung von Partikeln der Tonfraktion (Tonminerale, Oxide) aus dem Oberboden (Ae) in den Unterboden (Bt) mit Sickerwasser. Tonverlagerung kann in kalkfreien, aber noch nicht stark versauerten Boden mit geringer Aggregatstabilität stattfinden.

Turbation

Glossar

Vermischung von Bodenmaterial durch Tiere (\rightarrow Bioturbation), durch Quellung und Schrumpfung (Peloturbation), oder durch Gefrieren und Auftauen (\rightarrow Kryoturbation).

Verbraunung

Glossar

Braunfärbung des Bodens durch Entcarbonatisierung (sofern Carbonate vorhanden) und chemische Verwitterung von Silikaten. Bei der Verwitterung von Silikaten wird Fe(II) aus der Silikatstruktur freigesetzt, oxidiert und als Fe(III)-Hydroxid ausgefällt (Ferrihydrit). Fe-Hydroxide kristallisieren mit der Zeit zu Goethit (FeOOH, gelblich braun) um. Die Fe-Hydroxide und Oxide verleihen dem Boden seine braune Farbe. Siehe auch →Braunerde.

Verwitterung

Glossar

- Physikalische Verwitterung: Mechanische Zerkleinerung des Gesteins durch Frost, Temperaturschwankung, Abrasion , Die spezifische Oberfläche des Materials nimmt dabei zu.
- Chemische Verwitterung: Chemische Auflösung und Auswaschung einzelner Elemente (Ionen) bei Anwesenheit von Wasser. Gleichzeitige Umkristallisation oder Ausfällung gelösten Stoffe führt zur Bildung von sekundären Mineralien (z. B. Oxide, Tonmineralien).

Aufgabe

Ein Boden hat eine Kationenaustauschkapazität (KAK) von 150 mmol_c/kg. Die K-Sättigung der Kationentauscher beträgt 3% der KAK. Die Lagerungsdichte der obersten 30 cm des Bodens beträgt 1.3 g/cm³. Berechnen Sie, wieviel kg K pro ha in den obersten 30 cm des Bodens in austauschbarer Form gespeichert sind.

$$1 \text{ ha} \rightarrow 10^8 \text{ cm}^2 \rightarrow \text{in } 30 \text{ cm: } 3 \cdot 10^9 \text{ cm}^3$$

$$1.3 \text{ g/cm}^3 \cdot 3 \cdot 10^9 \text{ cm}^3 = 3.9 \cdot 10^9 \text{ g} = 3.9 \cdot 10^6 \text{ kg}$$

$$3.9 \cdot 10^6 \text{ kg} \cdot 4.5 \text{ mmol/kg} = 1.8 \cdot 10^7 \text{ mmol} \rightarrow 17550 \text{ mol}$$

$$MW(K) = 39 \text{ g/mol}$$

$$17550 \text{ mol} \cdot 39 \text{ g/mol} = 682.5 \text{ kg}$$

Aufgabe

Beschreiben Sie, wie und durch welche Prozesse sich eine Vernässung des Bodens auf den N-Kreislauf und die N-Aufnahme der Pflanzen auswirken kann. Zeichnen Sie zuerst den N-Kreislauf im Boden und diskutieren Sie die einzelnen Prozesse.

Problem 1:

Nitrifikation: $\text{NH}_4^+ \rightarrow \text{NO}_2^- \rightarrow \text{NO}_3^-$

O_2 ist für diese Reaktion Bedingung. Bei Vernässung fehlt $\text{O}_2 \rightarrow$ gehemmte Nitrifikation.

Problem 2:

Denitrifikation: $\text{NO}_3^- \rightarrow \text{NO}_2^- \rightarrow \text{NO} \rightarrow \text{N}_2\text{O} \rightarrow \text{N}_2$

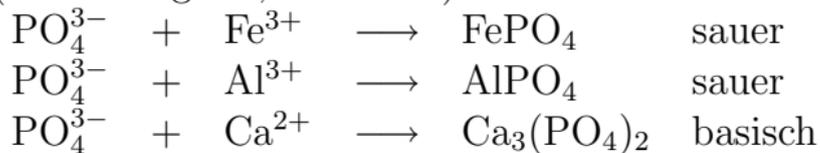
Bei Vernässung \rightarrow schlechte Durchlüftung \rightarrow Mikroorganismen nutzen NO_3^- zur Atmung \rightarrow N-Auswaschung wird begünstigt (wenn viel H_2O). Die nicht symbiontische N_2 -Fixierung ist gehemmt (wegen O_2 -Mangel).

Aufgabe

Warum ist die P-Verfügbarkeit in Böden bei mässig sauren pH Werten am höchsten? Formulieren Sie sich die Reaktionsgleichungen, die zur Ausfällung von schwerlöslichen Phosphaten bei sauren oder alkalischen pH werten führen können.

P-Verfügbarkeit bei pH-Werten zwischen 5.5 und 6 ist am höchsten

(Abbildung 8.8, Seite 111)



Aufgabe Appendix 2

Erläutern Sie den Unterschied zwischen primären und sekundären Mineralen. Nennen Sie Beispiele! Welche Bodeneigenschaften werden vor allem durch sekundäre Minerale bestimmt, welche durch primäre Minerale? Welche der beiden Gruppen dominieren die Tonfraktion von Böden?

Primäre Mineralien

Bestimmen Skelett

Quarz, Feldspäte, Glimmer, Amphibole, Pyroxene, Olivine

- Entstehen unter erhöhtem Druck und/oder erhöhter Temperatur
- Grössere Partikel
- dominieren in gröberen Fraktionen

Sekundäre Mineralien

Bestimmen Feinerde, dominieren die Tonfraktion von Böden

Tonmineralie, Kaolinit, Smektit, Vermikulit, Fe-Oxide, Fe-Hydroxide:
Hämatit, Goethit, Al-Hydroxide (Gibbsit)

- Entstehen durch chemische Verwitterung von primären Mineralien unter atmosphärischem Druck und Temperatur
- kleinere Partikel
- dominieren in feinen Fraktionen (vorallem Tonfraktionen)

Aufgabe Appendix 2

Was ist der Unterschied zwischen Gerüstsilikaten und Schichtsilikaten?
Nennen Sie Beispiele. Welche der beiden Gruppen dominieren die
Tonfraktion von Boden?

Gerüstsilikate

- SiO_2 Beispiel Feldspäte, Quarz
- 3-D-Struktur: stabiler \rightarrow schlechter verwitterbar

Schichtsilikate

- $\text{Si}_2\text{O}_5^{2-}$ Beispiel Glimmer
- 2-D-Struktur: \rightarrow grösserer Vernetzungsgrad

Hauptkomponente der Sand- und Schlufffraktion:

Tonminerale sind Schichtsilikate \rightarrow dominieren Tonfraktion

Aufgabe Appendix 2

Erläutern Sie, warum Tonminerale in der Regel negative strukturelle Ladung besitzen. Wie wird diese Ladung ausgeglichen?

Tonminerale sind Schichtsilikate

Beispiel Glimmer: $\text{Si}_2\text{O}_5^{2-}$

Negative Ladung entsteht durch isomorpher Ersatz ($\text{Si}^{4+} \rightarrow \text{Al}^3$)

Die überschüssige negative Ladung im Kristallgitter wird durch den Einbau anderer Kationen (K^+ , Na^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , Fe^{2+}) ausgeglichen.

Aufgabe Appendix 2

Die Silikate stellen, von der Masse her, die wichtigste Mineralgruppe in der Erdkruste dar. Erläutern Sie, Warum bestimmte Silikate leicht, andere Silikate schwer verwitterbar sind. Nennen Sie Beispiele. Welche sekundären Minerale könnten sich bei ihrer Verwitterung bilden?

Mit zunehmender Vernetzung der Si-Tetraeder und abnehmendem isomorphen Ersatz nimmt der Gehalt an anderen Kationen ab und die Verwitterungsstabilität nimmt zu.

Schwer verwitterbar Quarz, Feldspäte (Gerüstsilikate)

Leicht verwitterbar Olivine (Inselsilikate)

Es bilden sich Tonminerale (schichtsilikate) z. B: Illite, Vermikulite, Smektit, Sekundäre Chlorite, Kaolinite, Halloysite

Aufgabe Appendix 2

Erläutern Sie die strukturellen Unterschiede zwischen Quarz und Feldspaten. Warum findet man in stark verwitterten Böden Quarz in der Sandfraktion, aber keine Feldspäte?

Gleiche Vernetzung

Isomorpher Ersatz:

Quarz keinen

Feldspäte höher (jede 4. oder 2. Tetraederposition) → leichter
verwitterbar als Quarz

Bei stark verwitterten Böden:

Feldspäte sind total verwittert, Quarz noch nicht

Aufgabe Appendix 2

Warum sind die meisten Tonminerale plättchenförmig? Erläutern Sie den strukturellen, Aufbau (Tetraederschichten, Oktaederschichten, Zwischenschichtkationen, etc.) eines 1:1 und eines 2:1 Tonminerals.

Tonminerale sind Schichtsilikate

- 1:1**
- Abwechslungsweise **Okta-** und **Tetraederschicht**
 - Basisabstand: 0.7 nm
 - keine Kationen dazwischen
 - Beispiel: Kaolinit
- 2:1**
- **Tetra-, Okata-, Tetraederschicht**
 - Kationen, manchmal auch Wasser
 - Basisabstand: variabel: 1-2 nm
 - Beispiel: Illit, Smectit
- 2:2**
- **Tetra-, Okata-, Tetra-, Okataederschicht**
 - Beispiel: Chlorit

Aufgabe Appendix 2

Diskutieren Sie die wichtigsten Verwitterungsprozesse in folgenden Klimazonen am Beispiel Granit: (1) kontinentales, semi-arides Klima, (2) warm-humides Klima.

kontinentales, semi-arides Klima Granit ist ein Intrusivgestein: verwittert in der Regel physikalisch leicht, vorallem durch Temperatur- und Frostsprengung sowie auch durch Salzsprengung

warm humides Klima Granit ist ein saures Gestein: darauf entsteht in humiden Gebieten stark saure und oft relativ nährstoffarme Böden

- chemische Verwitterung: Hydrolyse und Protolyse
- in humiden Klima: pH 3 bis pH 7 (oft)
- Voraussetzung für chemische Verwitterung:
 - Vorhandesein von H_2O
 - Abtransport von Lösungsprodukten → humides Klima und ausreichende Drainage begünstigen chemische Verwitterung

Aufgabe Appendix 2

Welchen Einfluss könnten Bodenorganismen auf die Verwitterung von primären Mineralien haben? Diskutieren Sie!

- Bodenorganismen scheiden CO_2 und organische Säuren aus → beeinflussen Kalkauflösung und Mineralverwitterung
- Organismen schaffen Poren, tragen zur Bildung von stabilen Bodenaggregaten bei und durchmischen den Boden (Bioturbation)

Aufgabe Appendix 2

Beschreiben Sie, Wie Bodenorganismen die Bodenbildung beeinflussen können. Denken Sie an die Verwitterung, Kalkauflösung, Gefügebildung, Durchmischung (Bioturbation) und Umsetzung der Streu.

Verwitterung CO_2 und organische Säuren werden ausgeschieden

Kalkauflösung organische Säuren (Hydrolyse und Protolyse)

Gefügebildung hohe biologische Aktivität → Ausbildung eines Krümelgefüges (rundliche Aggregate, durch organische Substanzen verkittet und stabilisiert) → Schaffung von Grobporen: bessere Durchlüftung, schnellere Infiltration von H_2O (weniger Erosion), (Lebensraum)

Durchmischung Bioturbation Durchmischung des Bodens durch wühlende Bodentiere → Gefügebildung

Umsetzung der Streu Totes organisches Material (Streu) wird durch Bodenorganismen abgegeben → Huminstoffe. Mit der Zeit: Akkumulation von organischen Substanz: Humus

Aufgabe Appendix 2

Beschreiben Sie den Prozess der Peloturbation. Unter welchen Klimabedingungen ist dieser Prozess am ausgeprägtesten? Welchen Einfluss hat der Tongehalt und die Art der Tonminerale auf diesen Prozess?

Peloturbation Mischung von Bodenmaterial durch einen Wechsel von Schrumpfen bei Austrocknung und Quellen bei Befeuchtung

Klimabedingung warmes, wechselfeuchtes Klima

Boden Tonreicher Boden mit quellfähigen Tonmineralien
(Smektite)

Aufgabe Appendix 2

Sie vergleichen zwei Böden die sich unter humidem Klima gebildet haben. Einer der Böden hat sich aus Granit gebildet, der andere aus Basalt. Erläutern Sie zu erwartende Unterschiede hinsichtlich Tiefgründigkeit, Kornung, Wasserspeicherfähigkeit. und Nährstoffgehalt.

	Granit	Basalt
Tiefgründigkeit	Nicht so tiefgründig wegen Gerüst- und Schichtsilikaten	Tiefgründig wegen Band-, Insel- und Kettensilikate
Körnung	Granit ist intrusiv → Grobkörniger	Basalt ist Effusiv (= Extrusiv) → Feinkörniger
Wasserspeicherfähigkeit	H ₂ O: 0.47 → weniger Wasser gespeichert	H ₂ O: 0.91 → mehr Wasser gespeichert
Nährstoffgehalt	Granit ist sauer → nährstoffärmer	Granit ist basisch → nährstoffreicher

Aufgabe Appendix 2

Warum setzt die Silikatverwitterung und die damit einhergehende Verbraunung erst nach vollständiger Entkalkung eines Bodenhorizontes ein? Was versteht man unter dem Begriff Verbraunung?

Verbraunung ist Braunfärbung des Bodens als Folge des Entkalkung und chemischer Verwitterung silikatischer Bestandteile und die damit verbundene Entstehung oder Freisetzung von Fe(III) Oxiden und Hydroxyden.

1. Entkalkung (pH ↓ (unter 7))
2. Verwitterung der Silikate (Freisetzung von Fe)
3. Verbraunung ($\text{Fe}^{2+} \rightarrow \text{Fe}^{3+}$)

Aufgabe Appendix 2

Wozu braucht man eine Bodenklassifikation? Diskutieren Sie den Nutzen und mögliche Probleme bei der Klassifikation von Böden. Welche Funktionen sollte Ihrer Meinung nach eine Bodenkarte erfüllen können?

Wozu?

- Landwirtschaft, Forstwirtschaft
- Orts- und Regionalplanung
- Natur- und Umweltschutz
- Forschung

Probleme

- viele verschiedene Klimaten → viele verschiedene Bodenklassifikationen → zu viele Details für Weltkarte

Funktion

- Info über Art, Inhalt und Nutzung des Bodens

Aufgabe Appendix 2

Erläutern Sie, warum Lössböden mehr Wasser in pflanzenverfügbarer Form speichern können, als Boden. aus Sandsteinverwitterung oder aus Tonsteinverwitterung. Welcher Anteil des Wassers ist pflanzenverfügbar?

Löss ist ein Schluffboden

Sandboden 0-3 Vol-% Wassergehalt für Pflanzen verfügbares Wasser

Schluffboden 10-30 Vol-% ← am besten, da grösste grösster Bereich,
nFK am grössten

Tonboden 32-44 Vol-%

Aufgabe Appendix 2

Diskutieren Sie den Einfluss der Bodenstruktur auf Transportprozesse im Boden. Was versteht man unter präferentiellen Fließwegen? Welchen Einfluss haben sie auf den Transport von Stoffen in Böden?

Präferentielle Fließwege gebildet durch Makroporen

Je besser das Bodensystem, desto besser der Transport

Aufgabe Appendix 2

Welche Rolle spielen Makroporen im Boden hinsichtlich biologischer, physikalischer, und chemischer Prozesse. Diskutieren Sie!

Biologisch Makroporen sind Lebensraum für Organismen → bessere Bioturbation

Physikalisch • Frostsprengung

- Salzsprengung
- Wurzelsprengung
- Hydratation (besserer Gasaustausch)

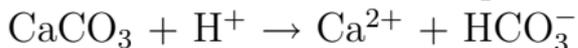
Chemisch Chemische Prozesse sind begünstigt, da grössere Oberfläche

Aufgabe Appendix 2

Böden sind in unterschiedlichem Masse gegen Säureinträge gepuffert. Nennen Sie die wichtigsten Puffermechanismen. Welche der Puffermechanismen sind in neutralen bis basischen, leicht sauren und stark sauren Böden wirksam?

Puffersysteme: SNK = Säureneutralisationskapazität

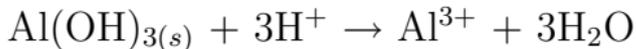
neutral bis leicht alkalisch pH 7.2 bis 8.2:



leicht sauer



<pH 5, sauer:



Aufgabe Appendix 2

Für welche Hauptnährelemente spielt der Kationenaustausch eine wichtige Rolle bei der Nährstoffspeicherung?

$\underbrace{\text{Ca}^{2+}, \text{Mg}^{2+}, \text{K}^+}_{\text{Hauptnährelemente}}, (\text{NH}_4^+), \quad \underbrace{\text{Al}^3, \text{H}^+}_{\text{saure Protonen}} \quad \text{Na}^+ : \text{für Kationenaustausch}$

Aufgabe Appendix 2

Erläutern Sie, wie sich die Al-Sättigung an Kationenaustauschern in einem Mineralboden verändert, wenn der Boden zunehmend versauert. Welchen Einfluss kann eine zu hohe Al^{3+} -Konzentration in der Bodenlösung auf das Pflanzenwachstum haben? Welche Rolle spielt dabei die organische Substanz im Boden?

Je tiefer der pH, desto höher wird die Al^{3+} -Konzentration in der Bodenlösung

→ hemmt Wurzelwachstum

→ löst bei empfindlichen Arten Wasser- und Nährstoffmangel aus (P, Mg)
(verstärkt durch saurer Regen)

Bei Versauerung wird das organische Material viel schlechter abgebaut

Aufgabe Appendix 2

Wie verändert sich die Belegung der Kationenaustauscher im Boden mit zunehmender Bodenversauerung (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ , Al^{3+} , H^+)?

Welche Konsequenzen kann dies für die Vegetation haben?

basisch \rightarrow sauer

K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ H^+ , Al^{3+}

Konsequenz: Puffersysteme arbeiten mit entsprechenden Kationen \rightarrow bei
Versauerung: Waldsterben

Aufgabe Appendix 2

Welche Prozesse beeinflussen den Stickstoffhaushalt eines Bodens? Sehen Sie einen Zusammenhang zwischen der Porenstruktur des Bodens (Durchlüftung!) und dem Stickstoffhaushalt?

Prozesse

- Biologische N_2 -Fixierung
- Mineralisierung (Mobilisation)
- Nitrifikation
- Denitrifikation
- Gasförmige NH_3 -Verluste
- N-Auswaschung

Zusammenhang:

Ja, je besser das Porensystem, umso besser die Durchlüftung, desto besser der ganze N-Kreislauf

Aufgabe Appendix 2

Wie würden Sie die Vorräte und Pflanzenverfügbarkeit von Kalzium, Stickstoff und Phosphor auf einer typischen Mullrendzina auf Kalkgestein einschätzen? Was könnten dort wachstumslimitierende Faktoren sein? Begründen Sie Ihre Aussagen.

- Wenn Kalkgestein verwittert $\rightarrow \text{Ca}^{2+} \Rightarrow$ viel Ca^{2+}
- viel PO_4^{3-} (wegen Ca-Phosphate)
- NH_4^+ auch vorhanden, da von aussen eingetragen und im Boden gespeichert wurde

Aufgabe Appendix 2

Was versteht man unter den Begriffen Humus, Huminstoffe, und Nicht-Huminstoffe?

Humus Gesamtheit der toten organischen Substanz, ausser Streustoffe (Huminstoffe und Nichthuminstoffe)

Huminstoffe stark umgeformte, dunkle, meist hochmolekulare Produkte des Ab- und Umbaus der Streustoffe durch Mikroorganismen

Nicht-Huminstoffe alle chemischen Verbindungen mit bekannter Struktur (z. B. Aminosäuren, Proteine, Zucker)

Aufgabe Appendix 2

Welchen Einfluss kann die organische Substanz auf physikalische, chemische, und biologische Funktionen des Bodens haben?

physikalische Funktion Durchlüftung, Wasserinfiltration,
Durchwurzelbarkeit, Wasserspeicherkapazität, Farbe

chemische, biologische Funktion Komplexierung toxischer
Metallkationen, Nahrungsgrundlage, enthält Wirkstoffe (positive
und negative), hohe KAK

Aufgabe Appendix 2

Sind hohe Gehalte an organischer Substanz generell ein Zeichen hoher Bodenfruchtbarkeit? Diskutieren Sie! Unter welchen Bedingungen findet man besonders hohe Gehalte an organischer Substanz?

Qualität eines Bodens hängt nicht von der Zusammensetzung der organischen Substanz ab und nicht von der Quantität.

Wenn abbau gehmmmt ist → besonders viel organische Substanz im Boden z. B. pH tief, zuviel H₂O

N ist ein stark ertragsbestimmendes Element

Aufgabe Appendix 2

Was versteht man unter den Humusformen Mull, Moder und Rohhumus?
Wie hängt die Bildung dieser Humusformen mit der Art der Streu und der biologischen Aktivität im Boden zusammen?

Mull

- gemässigt Klima, leicht abbaubare Streu, nährstoffreiche Böden, neutrale bis leicht saure pH-Werte → Streu wird schnell zersetzt
- Regenwürmer (aktive Bodenfauna)
- Oberboden gut durchlüftet und durchwurzelbar
- C/N: 7 bis 15

Moder

- kühl-feucht, mässig bis stark versauerte Waldböden, oft auf sandigen Böden (keine Regenwürmer) → organische Substanz wird langsam abgebaut, durchmischt
- Pilzhyphen (geben modrigen Geruch)
- C/N: 15 bis 20

Rohhumus

- nährstoffarme Böden
- schlecht abbaubare Streu
- C/N: 30 bis 40
- stark sauer: pH 2 bis 4
- riesige organische Auflage • fast keine Bodentiere, die wühlen

Aufgabe Appendix 2

Erläutern Sie den Einfluss der Vegetation auf die Bildung unterschiedlicher Humusformen.

- Art von Streu
- Regenwürmer: Bioturbation
- pH-Werte

Aufgabe Appendix 2

Eine Dauergrünlandfläche wird umgepflügt und als Ackerland genutzt. Wie verändert sich der Gehalt an organischer Substanz und die Bodenatmung (Abgabe von CO_2) als Folge dieser Umnutzung. Diskutieren Sie mögliche Prozesse und Ursachen.

Wiese

- Bioturbation
- wenig Streu
- Nährstoffgehalt „normal“
- reich an Zucker, Protein: C/N tief

Ackerland

- 1 bis 5% organische Substanz
- C/N hoch
- Gehalt organische Substanz nimmt ab
- Bodenatmung (Abgabe CO_2) da mehr Organismen im Boden

Aufgabe Appendix 2

Ein Niedermoor wird drainiert und als Ackerfläche genutzt. Welchen Einfluss hat dieser Eingriff auf den Kohlenstoffkreislauf im Boden? Wie beurteilen Sie diesen Eingriff hinsichtlich der Freisetzung von Nährstoffen?

Niedermoor: nährstoffreich Anschluss an Grundwasser

- Es werden viele Nährstoffe mit dem drainierten Wasser ausgeschwemmt
- C-Kreislauf

Aufgabe Appendix 2

Auf welche Weise beeinflusst das Porensystem eines Bodens die biologische Aktivität und den Lebensraum verschiedener Organismengruppen im Boden? Kennen Sie Bodentiere, die aktiv das Porensystem beeinflussen? Wie könnte sich anhaltender Sauerstoffmangel (anaerobe Verhältnisse) auf die Bodenfauna auswirken?

Mehr Poren → mehr Tiere → bessere Bioturbation: Durchlüftung,...

Aktiv

- Regebwurm
- Maulwurf
- Mäuse
- Arthropoden (Milben, Asseln, ...)

O₂-Mangel

Aerob lebende Tiere sterben

Aufgabe Appendix 2

Welche Rolle spielen die Bodenorganismen im globalen Kohlenstoffkreislauf? Was versteht man unter den Begriffen Produzenten, Konsumenten und Destruenten?

Produzent Autotrophe Organismen (Pflanzen) die organisches Material durch Photosynthese produzieren

Konsument Tiere der Makrofauna, die Teile der organischen Streu fressen, es wird unterschieden zwischen Primärzersetzer und Sekundärzersetzer

Destruent Mikroorganismen (Pilze, Bakterien), die das organische Material weiter zersetzen und zum Teil in anorganische Bestandteile (CO_2 , H_2O , Mineralstoffe) mineralisieren.