minærva

GL 4

SKRIPT

Wasser, Ökosysteme und Böden

Erklärskript

Die Aufgaben 142–188 zu diesem Skript stehen im Aufgabenskript, die Lösungen im Lösungsskript. Verweise auf Aufgaben sind Links.

Geographie – Leistungsfach Kursstufe

Pirmin Gohn

Nutzungshinweis: Dieses Skript darf nur im Rahmen des Unterrichts verwendet werden; insbesondere ist die eigenständige Weitergabe untersagt.

Skriptreihe GL · Geographie-Leistungsfach

GL1	GL2	GL3	GL4	GL5	GL6	GL7	GL-K
Endogene Prozesse	Landschaften	Atmosphäre	Wasser, Böden	Klimawandel	Bevölkerung, Stadt	Disparitäten	Kompakt

Lernen mit minærva

Dieses Skript ist ein Teil von minærva. Alles gehört zusammen: Jedes Thema führt von der Erklärung zum Üben, zum Ausprobieren und ins große Bild.

minaerva.de

Skripte Verstehen
Der Stoff zum Nachlesen: Erklärungen, Herleitungen, Beispiele und typische Fehler.
minaerva.de

noctua Üben
Fragen zu jedem Abschnitt, mit sofortiger Rückmeldung.
noctua.minaerva.de

fabrica Ausprobieren
Versuche und Anschauungen zum Selbermessen und Anfassen, ohne Konto, auch auf dem iPad.
fabrica.minaerva.de

tela Vernetzen
Das Wissensnetz: worauf ein Thema aufbaut und wohin es führt.
tela.minaerva.de

So greifen die Skripte ineinander

Erklärskripte	Geographie-Leistungsfach: sieben Themenskripte GL1–GL7 mit dem Stoff, aber ohne Aufgaben. Unter jeder Abschnittsüberschrift steht, zu welcher Teilkompetenz des Bildungsplans er gehört und ob er zum Schwerpunkt der schriftlichen Abiturprüfung zählt.
Aufgabenskript	Ein gemeinsames Aufgabenskript für alle Themen. Die Erklärskripte verweisen darauf; jede Aufgaben-, Abbildungs- und Tabellennummer gibt es in der Reihe nur einmal.
Lösungsskript	Die Lösungen zu allen Aufgaben, mit denselben Nummern.
Kompakt	GL-K: alle Fachbegriffe, Modelle und wichtigen Abbildungen auf wenigen Seiten, zum schnellen Wiederholen.

Am Ende vieler Abschnitte stehen Links zur passenden Übung, zum Versuch und ins Wissensnetz. In der PDF-Datei lassen sie sich direkt antippen.

Inhaltsverzeichnis

Worum es geht 5
1 Wasserkreislauf und Wasserhaushalt 6
1.1 Die Prozesse des Wasserkreislaufs 6
1.2 Speicher und Verweilzeiten 7
1.3 Der Wasserhaushalt eines Gebiets 7
1.4 Oberflächenwasser und Grundwasser 8
2 Salz- und Süßwasser: das Wasserdargebot 9
2.1 Wie viel Wasser gibt es? 9
2.2 Wasserdargebot und Wasserverfügbarkeit 9
2.3 Warum das Wasserdargebot so ungleich verteilt ist 10
2.4 Klimawandel und Wasserdargebot 10
3 Wassernutzung, Wasserqualität, Wasserkonflikte 12
3.1 Wasserbedarf und Wasserverbrauch 12
3.2 Wassergewinnung 12
3.3 Wasserqualität 13
3.4 Wasserkonflikte und Übernutzung 13
4 Ökosysteme und ihre Verbreitung 15
4.1 Was ist ein Ökosystem? 15
4.2 Das Klima steuert die Verbreitung 15
4.3 Die zonalen Ökosysteme im Überblick 16
4.4 Ein azonales Ökosystem: die Mangrove 19
5 Relief und Höhenlage: Höhenstufen 21
5.1 Warum sich die Vegetation mit der Höhe ändert 21
5.2 Die Alpen 21
5.3 Die tropischen Anden 22
5.4 Weitere Einflüsse des Reliefs 22
6 Mittelmeerraum: Eingriffe und Nachhaltigkeit 23
6.1 Naturraum 23
6.2 Wildpflanzen und Kulturpflanzen 23
6.3 Eingriffe in das Ökosystem 23
6.4 Moderne Nutzung: Bewässerung, Gewächshäuser, Tourismus 24
6.5 Konzepte einer nachhaltigen Nutzung 25
7 Sahelzone: Desertifikation und Nachhaltigkeit 26
7.1 Lage und Klima 26
7.2 Traditionelle Nutzung 27
7.3 Desertifikation 27
7.4 Konzepte einer nachhaltigen Nutzung 28
8 Boden als dynamisches Ökosystem 30
8.1 Woraus Boden besteht 30
8.2 Korngröße und Bodenart 30
8.3 Bodenwasser und Bodenluft 30
8.4 Bodenlebewesen 31
8.5 Verwitterung, Tonminerale und Mineralsalze 31
8.6 Abbau der Streu: Mineralisierung und Humifizierung 31
8.7 Mineralsalzkreislauf und Nährstoffhaushalt 32
8.8 Boden als dynamisches Ökosystem 32
9 Bodenbildung und Bodentypen 34
9.1 Bodenhorizont, Bodenprofil, Bodentyp 34
9.2 Die Bodenbildungsfaktoren 34
9.3 Die bodenbildenden Prozesse des Plans 35
9.4 Sieben Bodentypen 35
9.5 Räumliche Verbreitung 37

10 Bodenfruchtbarkeit und nachhaltige Nutzung 39
10.1 Bodenfruchtbarkeit 39
10.2 Kationenaustauschkapazität und Ton-Humus-Komplex 39
10.3 Die Bodentypen im Vergleich 40
10.4 Drei Bodentypen unter dem Aspekt der Nachhaltigkeit 40
10.5 Böden schützen 41

Worum es geht

Ein Glas Leitungswasser in Stuttgart war vor wenigen Tagen noch Wasser im Bodensee, sechzig Meter unter der Oberfläche vor Sipplingen. Die Tomate im Supermarkt ist im Winter oft in einem Gewächshaus bei Almería gewachsen, gegossen mit Grundwasser, das sich dort in Jahrtausenden angesammelt hat. Und ob ein Acker in der Ukraine, im Kraichgau oder am Rand des Amazonas-Regenwalds gute Ernten bringt, entscheidet ein Boden, dessen oberster Meter in vielen Jahrtausenden entstanden ist und der in wenigen Jahrzehnten verloren gehen kann.

Dieses Skript behandelt drei Sphären des Systems Erde, die eng zusammenhängen: die **Hydrosphäre** (Wasserkreislauf, Wasserdargebot und Wassernutzung), die **Biosphäre** (Verbreitung der Ökosysteme, Folgen menschlicher Eingriffe im Mittelmeerraum und in der Sahelzone) und die **Pedosphäre** (Bodenbildung, Bodentypen, Bodenfruchtbarkeit). Der rote Faden ist immer derselbe: Klima, Relief, Gestein, Wasser und Lebewesen wirken zusammen, und der Mensch greift in dieses Gefüge ein, mal nachhaltig, mal zerstörerisch.

Die Klimazonen und die Klimaklassifikation stehen in **GL3**, die Ursachen und Folgen des Klimawandels in **GL5**; hier wird darauf nur verwiesen. Die Verwitterung als Grundlage der Bodenbildung steht in **GL2**.

Wasser, Ökosysteme und Böden im Lehrplan. Bildungsplan Geographie, Leistungsfach: 3.5.2.3–3.5.2.5. Die Marken unter den Überschriften sagen genau, welcher Abschnitt zu welcher Teilkompetenz gehört.

Lehrplan-Marken. Unter jeder Abschnittsüberschrift steht, zu welcher Teilkompetenz des Bildungsplans Geographie (Baden-Württemberg 2016, Leistungsfach, Abschnitt 3.5) der Abschnitt gehört, z. B. `BP 3.5.2.2 (1)` . Die Marke `Abi 2027` zeigt die Schwerpunkte der schriftlichen Abiturprüfung 2027. Sie wechseln von Jahr zu Jahr; alles andere bleibt Stoff des Leistungsfachs und kann mündlich geprüft werden.

Wahlpflicht im Bildungsplan. Teilkompetenz 3.5.2.4 (2) verlangt **einen** Raum, Mittelmeerraum **oder** Sahelzone; dieses Skript bringt **beide** (Kapitel 6 und 7). Für 3.5.2.5 (2) und (3) genügen **drei** Bodentypen; hier stehen **alle sieben** Bodentypen der Liste des Plans. Was im Kurs behandelt wird, legt die Lehrkraft fest.

Die Aufgaben zu diesem Skript stehen im Aufgabenskript der Reihe, die Lösungen im Lösungsskript. Jedes Kapitel endet mit einem Kasten der Fachbegriffe des Bildungsplans und mit einem Verweis auf passende Übungen in **noctua**. Fachbegriffe des Plans sind beim ersten Auftreten fett gedruckt.

1 Wasserkreislauf und Wasserhaushalt

BP 3.5.2.3 (1)

Wasser ist der einzige Stoff, der auf der Erde in allen drei Aggregatzuständen in großen Mengen vorkommt: als Eis in den Polargebieten und Gebirgen, als flüssiges Wasser in Meeren, Seen, Flüssen und im Untergrund, als Wasserdampf in der Atmosphäre. Zwischen diesen Speichern ist es ständig unterwegs. Angetrieben wird diese Bewegung von der Sonnenstrahlung, die Wasser verdunsten lässt, und von der Schwerkraft, die es als Niederschlag und Abfluss wieder nach unten bringt.

1.1 Die Prozesse des Wasserkreislaufs

Der Wasserkreislauf (Abbildung 99) lässt sich als Folge von Prozessen beschreiben, die Wasser von einem Speicher in den nächsten bringen.

- **Verdunstung.** Wasser geht von der flüssigen in die gasförmige Phase über. Verdunstet es von einer freien Wasser-, Boden- oder Schneeoberfläche, heißt das **Evaporation**. Geben Pflanzen Wasser über die Spaltöffnungen ihrer Blätter ab, heißt das **Transpiration**. Beides zusammen nennt man **Evapotranspiration**; über bewachsenem Land ist sie die wichtigste Form der Verdunstung. Verdunsten braucht Energie (etwa 2,5 MJ je Kilogramm Wasser), die beim Kondensieren in der Atmosphäre wieder frei wird: Der Wasserkreislauf transportiert also auch Wärme.
- **Transport und Kondensation.** Wasserdampf wird mit dem Wind verfrachtet. Kühlt die Luft beim Aufsteigen ab, kondensiert der Dampf an Kondensationskernen zu Wolkentröpfchen oder Eiskristallen (Wolkenbildung, ausführlich in GL3).
- **Niederschlag.** Werden Tropfen oder Eiskristalle so schwer, dass Aufwinde sie nicht mehr tragen, fallen sie als **Niederschlag** aus: Regen, Schnee, Graupel, Hagel; dazu kommen Tau, Reif und Nebelniederschlag an Pflanzen.
- **Interzeption.** Ein Teil des Niederschlags bleibt auf Blättern hängen und verdunstet von dort, ohne den Boden zu erreichen (in Wäldern bis zu einem Drittel).
- **Versickerung.** Wasser, das in den Boden eindringt (Infiltration) und nach unten durch die ungesättigte Zone wandert, heißt Sickerwasser. Die **Versickerung** füllt das Bodenwasser auf und, wenn der Boden gesättigt ist, das Grundwasser (Grundwasserneubildung). Wie viel versickert, hängt von Bodenart, Vegetation, Hangneigung, Niederschlagsintensität und Versiegelung ab.
- **Abfluss.** Was nicht verdunstet und nicht gespeichert wird, fließt ab: oberirdisch als **Oberflächenabfluss** in Rinnen, Bächen und Flüssen, unterirdisch als **Grundwasserabfluss**, der Quellen und Flüsse speist und schließlich das Meer erreicht.

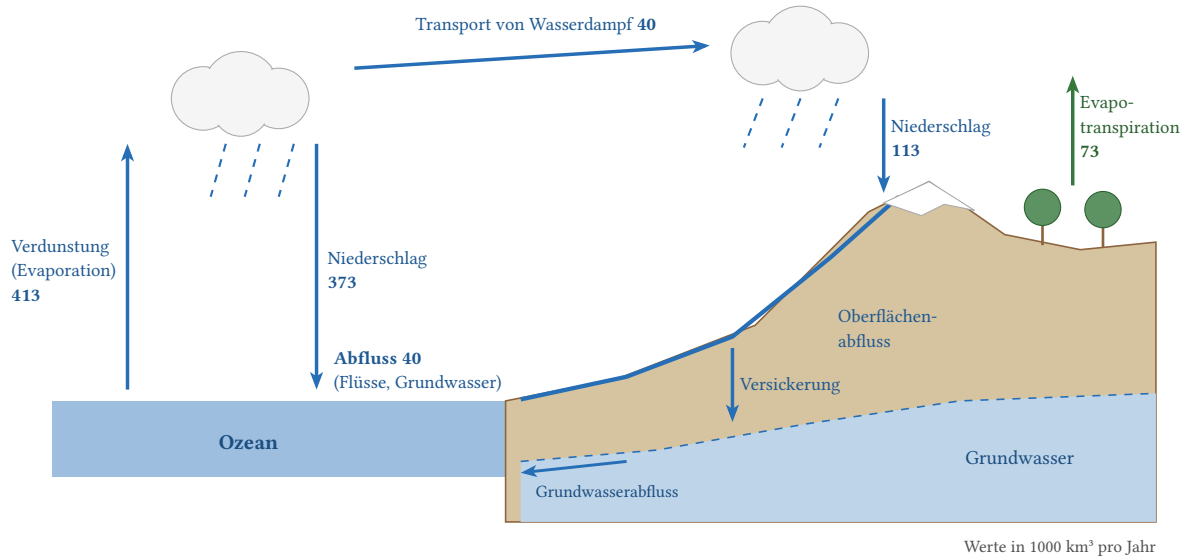


Abbildung 99: Der globale Wasserkreislauf (schematisch). Werte in 1000 km³ pro Jahr, gerundet. Über dem Meer verdunstet mehr, als dort fällt; der Überschuss von etwa 40 000 km³ wird als Wasserdampf zum Land getragen und kehrt als Abfluss zurück. Daten: Trenberth u. a. 2007.

Die Zahlen in Abbildung 99 zeigen eine Bilanz, die man sich merken sollte. Über den Ozeanen verdunsten jährlich etwa 413000 km³ Wasser, es fallen dort aber nur etwa 373000 km³. Über dem Land fallen etwa 113000 km³, verdunsten aber

nur etwa 73000 km³. Die Differenz von etwa 40000 km³ ist der Wasserdampf, der vom Meer zum Land transportiert wird, und zugleich der Abfluss, der vom Land ins Meer zurückkehrt. **Nur dieser Abfluss ist das Süßwasser, das sich Jahr für Jahr erneuert und das der Mensch nachhaltig nutzen kann.**

1.2 Speicher und Verweilzeiten

Wasser hält sich in den Speichern sehr unterschiedlich lange auf. Die **Verweilzeit** ist das Verhältnis aus gespeicherter Menge und jährlichem Durchsatz. In der Atmosphäre bleibt ein Wassermolekül im Mittel nur etwa neun Tage, in Flüssen wenige Wochen, im Boden Wochen bis Monate. Grundwasser ist Jahre bis Jahrtausende unterwegs, im Weltmeer verweilt Wasser im Mittel einige Tausend Jahre, im antarktischen Eis Zehntausende Jahre. Daraus folgt eine wichtige Unterscheidung:

- **Erneuerbares Wasser** ist das, was der Kreislauf laufend nachliefert (Abfluss, Grundwasserneubildung).
- **Fossiles Grundwasser** hat sich unter anderen Klimabedingungen gebildet, etwa in den Feuchtphasen der Sahara vor einigen Tausend Jahren, und wird heute kaum neu gebildet. Wer es fördert, baut einen Vorrat ab wie bei Erdöl.

1.3 Der Wasserhaushalt eines Gebiets

Für ein Flusseinzugsgebiet, ein Land oder ein Feld kann man eine Bilanz aufstellen. Sie heißt **Wasserhaushalt** und wird mit der **Wasserhaushaltsgleichung** beschrieben:

$$N = V + A + \Delta S.$$

Dabei ist N der Niederschlag, V die Verdunstung (Evapotranspiration), A der Abfluss (ober- und unterirdisch) und ΔS die Änderung der gespeicherten Wassermenge in Boden, Grundwasser, Seen und Schnee. Alle Größen werden in Millimetern Wasserhöhe pro Jahr angegeben; 1 mm entspricht einem Liter pro Quadratmeter. Über viele Jahre gemittelt ist ΔS meist klein, dann gilt $N \approx V + A$.

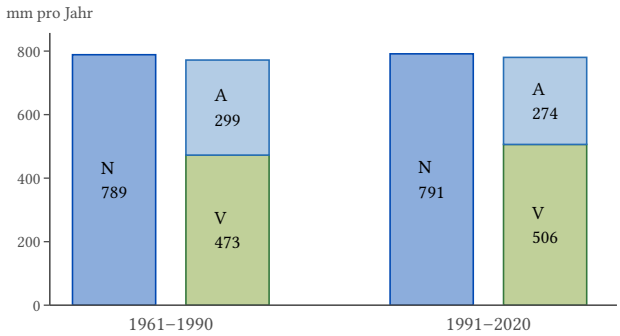


Abbildung 100: Wasserhaushalt Deutschlands: Niederschlag (N), Verdunstung (V) und Abfluss aus dem Bundesgebiet (A) in mm pro Jahr, Mittel zweier Klimanormalperioden. Kleine Differenzen zwischen N und V + A entstehen durch Rundung und Messfehler. Daten: UBA nach BfG (2026), umgerechnet auf die Fläche Deutschlands.

Abbildung 100 zeigt den Wasserhaushalt Deutschlands. Im Mittel fallen knapp 800 mm Niederschlag im Jahr. Rund zwei Drittel davon verdunsten, ein Drittel fließt ab. Im Vergleich der Zeiträume 1961–1990 und 1991–2020 ist der Niederschlag fast gleich geblieben, die Verdunstung aber gestiegen: Wärmere Sommer und eine längere Vegetationszeit lassen mehr Wasser verdunsten, für Abfluss und Grundwasserneubildung bleibt weniger. Das ist eine erste Spur des Klimawandels im Wasserhaushalt (mehr dazu in GL5).

Beispiel 1

Ein Fichtenwald im Schwarzwald und ein Acker in der Oberrheinebene. Auf den Höhen des Nordschwarzwalds fallen leicht 1800 mm Niederschlag im Jahr (Steigungsregen auf der Luvseite), in der Oberrheinebene bei Karlsruhe dagegen nur etwa 750 mm. Weil die Verdunstung in beiden Gebieten von der Energie begrenzt wird und sich weniger unterscheidet (in der warmen Ebene ist sie sogar etwas höher), bleibt im Schwarzwald ein großer Überschuss für den Abfluss: Murg, Enz und Kinzig führen viel Wasser. In der Ebene bleibt wenig; im Sommer ist die Bilanz hier oft negativ, der Boden trocknet aus, Felder müssen beregnet werden.

1.4 Oberflächenwasser und Grundwasser

Oberflächenwasser ist alles Wasser, das offen an der Landoberfläche steht oder fließt: Bäche, Flüsse, Seen, Talsperren. Es reagiert schnell auf Niederschlag, ist aber auch leicht verschmutzbar. **Grundwasser** ist das Wasser, das die Hohlräume des Untergrunds zusammenhängend ausfüllt (Abbildung 101).

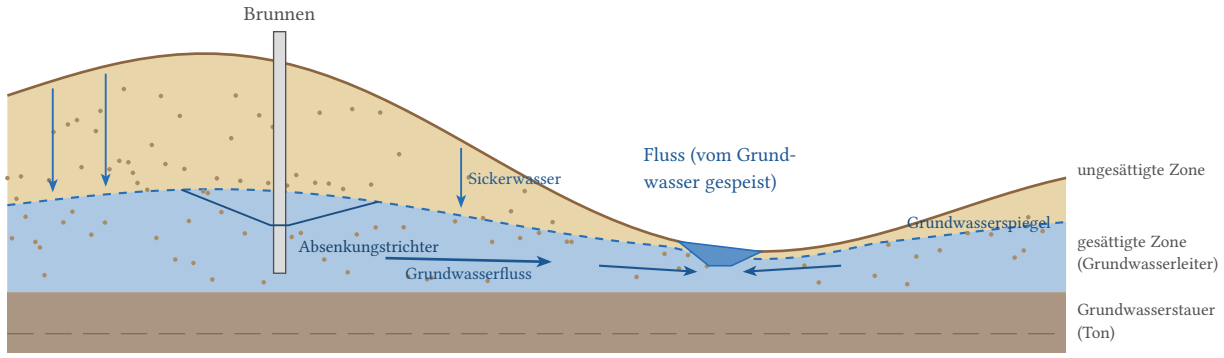


Abbildung 101: Grundwasser im schematischen Profil. Sickerwasser durchquert die ungesättigte Zone und füllt den Grundwasserleiter auf, der auf einer undurchlässigen Schicht (Grundwasserstauer) liegt. Ein Brunnen senkt den Grundwasserspiegel trichterförmig ab; der Fluss im Tal wird hier vom Grundwasser gespeist.

- Der **Grundwasserleiter** (Aquifer) ist ein Gestein mit vielen verbundenen Hohlräumen: Kies und Sand (Porengrundwasserleiter, etwa im Oberrheingraben, einem der größten Grundwasservorkommen Mitteleuropas), geklüfteter Sandstein (Kluftgrundwasserleiter) oder verkarsteter Kalkstein (Karstgrundwasserleiter, Schwäbische Alb).
- Darunter liegt ein **Grundwasserstauer** aus Ton oder dichtem Gestein.
- Die Oberfläche des Grundwassers heißt **Grundwasserspiegel**. Er folgt abgeschwächt dem Gelände und schwankt mit den Jahreszeiten: Im Winterhalbjahr, wenn wenig verdunstet, wird Grundwasser neu gebildet; im Sommer sinkt der Spiegel.
- Grundwasser fließt langsam (Zentimeter bis Meter pro Tag) zu Quellen, Flüssen oder ins Meer. Wo ein Fluss tiefer liegt als der Grundwasserspiegel, wird er vom Grundwasser gespeist; liegt er höher, versickert Flusswasser in den Untergrund (**Uferfiltrat**, eine wichtige Form der Trinkwassergewinnung am Rhein).

Grundwasser ist gegen Verschmutzung besser geschützt als Oberflächenwasser, weil Boden und Gestein es filtern. Ist es aber einmal verschmutzt, etwa durch Nitrat aus der Düngung oder durch Chemikalien, bleibt es das wegen der langen Verweilzeit oft für Jahrzehnte. In Deutschland stammen rund zwei Drittel des Trinkwassers aus Grund- und Quellwasser.

Merksatz

Der Wasserkreislauf verbindet Ozean, Atmosphäre und Land. Über dem Meer überwiegt die Verdunstung, über dem Land der Niederschlag; der Überschuss kehrt als Abfluss ins Meer zurück. Der Wasserhaushalt eines Gebiets folgt der Gleichung $N = V + A + \Delta S$. Erneuerbar und nachhaltig nutzbar ist nur das Wasser, das Abfluss und Grundwasserneubildung laufend nachliefern.

Fachbegriffe
Evaporation: Verdunstung von freien Wasser-, Boden- und Schneeflächen
Grundwasser: Wasser, das die Hohlräume des Untergrunds über einem Stauer zusammenhängend ausfüllt
Niederschlag: aus der Atmosphäre ausfallendes Wasser (Regen, Schnee, Hagel, Tau …), gemessen in mm
Oberflächenwasser: offen stehendes oder fließendes Wasser an der Landoberfläche (Flüsse, Seen, Talsperren)
Transpiration: Wasserabgabe der Pflanzen über die Spaltöffnungen der Blätter
Versickerung: Eindringen und Abwärtswandern von Wasser durch den Boden bis zum Grundwasser
Wasserhaushalt: Bilanz aus Niederschlag, Verdunstung, Abfluss und Speicheränderung eines Gebiets: $N = V + A + \Delta S$

Üben: **noctua** ↗

2 Salz- und Süßwasser: das Wasserdargebot

BP 3.5.2.3 (2)

Die Erde ist ein Wasserplanet; trotzdem leiden Milliarden Menschen zumindest zeitweise unter Wassermangel. Wie passt das zusammen? Die Antwort liegt in drei Fragen: Wie viel des Wassers ist Süßwasser? Wie viel davon erneuert sich? Und wo und wann steht es zur Verfügung?

2.1 Wie viel Wasser gibt es?

Insgesamt gibt es auf der Erde rund 1,4 Milliarden km³ Wasser. Davon liegen gut 96 Prozent im **Meer**. Meerwasser ist **Salzwasser**: Es enthält im Mittel etwa 35 g gelöste Salze je Liter, vor allem Natriumchlorid. Für Menschen, die meisten Landtiere und Nutzpflanzen ist es ohne Aufbereitung unbrauchbar. Dazu kommen salziges Grundwasser und Salzseen.

Süßwasser enthält weniger als etwa 1 g gelöste Salze je Liter. Es macht nur rund 2,5 Prozent aller Wasservorräte aus, und davon ist der größte Teil schwer zugänglich (Abbildung 102): Mehr als zwei Drittel sind in Gletschern und Eisschilden gebunden, fast ein Drittel ist Grundwasser, oft in großer Tiefe. Seen, Flüsse, Bodenfeuchte und Atmosphäre zusammen enthalten nur gut ein Prozent des Süßwassers.

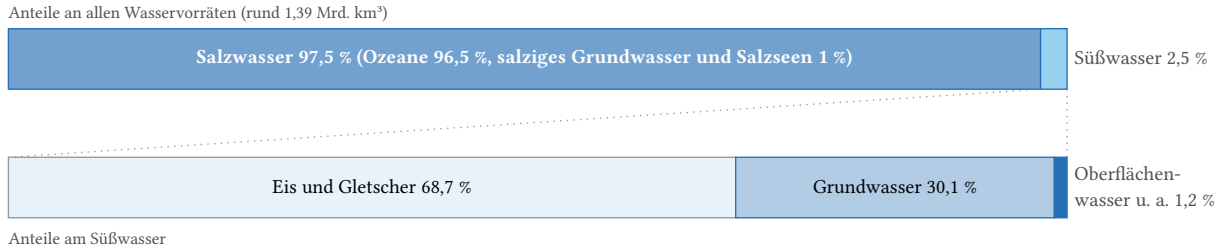


Abbildung 102: Die Wasservorräte der Erde. Oben: Anteile an allen Vorräten; unten: Aufteilung des Süßwassers. Daten: USGS Water Science School (nach Gleick 1996), gerundet.

Typischer Fehler

Falsch: „Es gibt nur 2,5 % Süßwasser, also wird das Wasser knapp, wenn wir es verbrauchen."

Richtig: Wasser wird nicht vernichtet, es bleibt im Kreislauf. Knapp ist das **erneuerbare** Süßwasser an einem bestimmten Ort zu einer bestimmten Zeit in brauchbarer Qualität.

Entscheidend sind Flüsse (Durchsatz pro Jahr), nicht Vorräte. Ein großer See kann in einem Trockengebiet trotzdem übernutzt werden, wenn mehr entnommen wird als zufließt.

2.2 Wasserdargebot und Wasserverfügbarkeit

Das **Wasserdargebot** ist die Menge an Süßwasser, die in einem Gebiet in einem Zeitraum (meist einem Jahr) natürlich zur Verfügung steht: der Abfluss aus dem eigenen Niederschlag plus der Zufluss aus Nachbargebieten. In Deutschland sind das im Mittel 1991–2020 rund 176 Mrd. m³ im Jahr, davon stammen etwa 108 Mrd. m³ aus dem eigenen Niederschlag und rund 68 Mrd. m³ fließen mit Rhein, Donau, Elbe und anderen Flüssen aus den Nachbarländern zu (Daten: UBA nach BfG 2026).

Das Wasserdargebot ist eine Größe der Natur. Die **Wasserverfügbarkeit** fragt dagegen, wie viel davon die Menschen tatsächlich nutzen können. Sie hängt zusätzlich davon ab,

- **wann** das Wasser kommt (Regenzeit oder gleichmäßig über das Jahr verteilt, Schmelzwasser im Frühjahr),
- **wo** es fließt (im dünn besiedelten Gebirge oder dort, wo Menschen leben),
- **wie gut** es ist (Salzgehalt, Verschmutzung) und
- ob es **Technik und Geld** gibt, um es zu fassen, zu speichern, aufzubereiten und zu verteilen.

Als einfaches Maß dient das erneuerbare Wasserdargebot pro Kopf und Jahr. Nach der schwedischen Hydrologin Malin Falkenmark spricht man unterhalb von 1700 m³ pro Kopf und Jahr von **Wasserstress**, unterhalb von 1000 m³ von **Wasserknappheit** und unterhalb von 500 m³ von **absoluter Wasserknappheit** (Abbildung 103). Deutschland liegt mit etwa 2100 m³ pro Kopf und Jahr darüber; Ägypten, das fast nur vom Nil lebt, liegt bei etwa 500 m³.

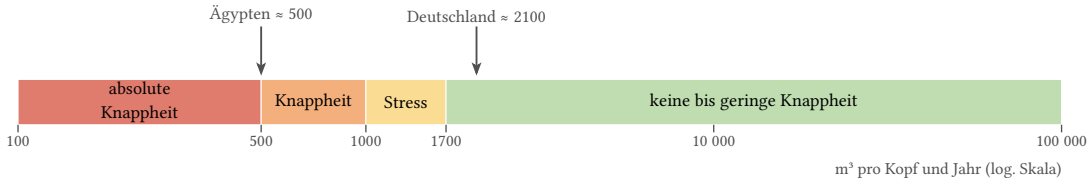


Abbildung 103: Erneuerbares Wasserdargebot pro Kopf und Jahr und die Schwellen nach Falkenmark (logarithmische Skala). Deutschland: 176 Mrd. m³ für 84,7 Mio. Einwohner; Ägypten: rund 57 km³ für rund 112 Mio. Einwohner. Daten: UBA nach BfG 2026, FAO AQUASTAT, gerundet.

Der Indikator ist einfach, hat aber Grenzen: Er sagt nichts über die Verteilung innerhalb eines Landes, nichts über die Jahreszeiten und nichts darüber, wie viel Wasser tatsächlich gebraucht wird. Deshalb nutzt man zusätzlich den **Wassernutzungsindex**: Er setzt die Entnahme ins Verhältnis zum Dargebot. Ab etwa 20 % gilt ein Gebiet als unter Wasserstress, ab 40 % als stark gestresst. Deutschland entnahm 2022 rund 17,9 Mrd. m³, also etwa 10 % seines Dargebots (UBA).

2.3 Warum das Wasserdargebot so ungleich verteilt ist

Das Wasserdargebot ist ein Ergebnis von Niederschlag minus Verdunstung. Es folgt deshalb zuerst den Klimazonen (GL3):

- **Global:** Hohe Werte haben die immerfeuchten Tropen (Amazonien, Kongobecken, Südostasien), wo es viel regnet, und die kühlen Zonen der Westwinddrift (Skandinavien, Kanada), wo wenig verdunstet. Sehr niedrig ist es in den Wendekreiswüsten (Sahara, Arabien, Australien) und in den Binnenwüsten Zentralasiens.
- **Regional:** Gebirge wirken als Wasserschlösser. Luvseiten bekommen Steigungsregen, Leeseiten liegen im Regenschatten (Kapitel 5). Die Alpen liefern einen großen Teil des Wassers für Rhein, Rhône, Po und Donau; Himalaya und Tibet speisen Indus, Ganges, Brahmaputra, Jangtse und Mekong. **Fremdlingsflüsse** wie Nil, Indus oder Colorado tragen Wasser aus feuchten Gebirgen durch Trockengebiete.
- **Lokal:** Gestein und Boden entscheiden, wie viel versickert und gespeichert wird. Ein Kiesgrundwasserleiter wie im Oberrheingraben speichert riesige Mengen; im Karst der Schwäbischen Alb versickert das Wasser so schnell, dass die Hochfläche trotz reichlich Niederschlag oberirdisch fast wasserlos ist („Wassernot auf der Alb“ bis zum Bau der Albwasserversorgung im 19. Jahrhundert).
- **Zeitlich:** Monsun- und Savannenklimate haben Regen- und Trockenzeit, Mittelmeerklimate trockene Sommer (genau dann, wenn Landwirtschaft und Tourismus am meisten brauchen). Hinzu kommt die Schwankung von Jahr zu Jahr, die in Trockengebieten besonders groß ist.

2.4 Klimawandel und Wasserdargebot

Der **Klimawandel** verändert das Wasserdargebot auf allen Maßstabsebenen; die Ursachen und Szenarien behandelt GL5. Für den Wasserhaushalt ist wichtig: Wärmere Luft kann mehr Wasserdampf aufnehmen (etwa 7 % mehr je Kelvin). Dadurch wird der Wasserkreislauf intensiver. Als grobe Regel gilt: Feuchte Gebiete werden feuchter, Starkregen häufiger, viele trockene Gebiete trockener. Höhere Temperaturen steigern zudem die Verdunstung, sodass selbst bei gleichem Niederschlag weniger abfließt.

- **Gebirge:** Gletscher schrumpfen. Zunächst liefern sie mehr Schmelzwasser, später fehlt ihr Beitrag im Sommer („peak water“). Niederschlag fällt häufiger als Regen statt als Schnee und fließt sofort ab, statt bis zum Frühsommer gespeichert zu werden. Betroffen sind die Anden (Lima, La Paz), Zentralasien und die Alpen.
- **Mittelmeerraum:** Die Modelle erwarten weniger Niederschlag und mehr Verdunstung (Kapitel 6).
- **Mitteleuropa:** Mehr Winterniederschlag, trockenere Sommer, häufigere Starkregen; in Deutschland sank die Grundwasserneubildung in mehreren trockenen Jahren seit 2018 deutlich.

Fachbegriffe
Klimawandel: langfristige Änderung des Klimas, heute vor allem durch den anthropogenen Treibhauseffekt; verstärkt den Wasserkreislauf und verschiebt das Wasserdargebot (GL5)
Meer: zusammenhängende Salzwassermasse der Ozeane und ihrer Nebenmeere; größter Wasserspeicher der Erde
Salzwasser: Wasser mit hohem Salzgehalt (Meerwasser im Mittel etwa 35 g je Liter), ohne Aufbereitung nicht als Trink- oder Gießwasser nutzbar
Süßwasser: Wasser mit weniger als etwa 1 g gelösten Salzen je Liter; nur etwa 2,5 % aller Wasservorräte
Wasserdargebot: natürlich verfügbare, sich erneuernde Süßwassermenge eines Gebiets pro Jahr (eigener Abfluss plus Zufluss)
Wasserverfügbarkeit: für Menschen tatsächlich nutzbarer Teil des Dargebots, abhängig von Zeit, Ort, Qualität, Technik und Kosten

Üben: **noctua** ↗

3 Wassernutzung, Wasserqualität, Wasserkonflikte

BP 3.5.2.3 (2)

Ob Wasser knapp ist, entscheidet nicht nur die Natur, sondern auch, wie viel die Menschen brauchen, wie sie es gewinnen und wie sie damit umgehen.

3.1 Wasserbedarf und Wasserverbrauch

Der **Wasserbedarf** ist die Wassermenge, die eine Gruppe (Haushalte, Landwirtschaft, Industrie, Kraftwerke) für ihre Zwecke benötigt oder voraussichtlich benötigen wird. Man unterscheidet zwei Arten der Nutzung:

- **Wasserentnahme** (Wassergebrauch): Wasser wird entnommen, genutzt und anschließend, oft erwärmt oder verschmutzt, zurückgegeben. Das gilt für das Kühlwasser eines Kraftwerks und zum größten Teil auch für das Wasser in Haushalten, das als Abwasser über die Kläranlage in den Fluss zurückkehrt.
- **Wasserverbrauch** im engeren Sinn: Wasser wird dem Gebiet tatsächlich entzogen, weil es verdunstet (Bewässerung, Kühltürme), in Produkte eingeht oder versickert, wo es niemand mehr fassen kann.

Diese Unterscheidung erklärt einen scheinbaren Widerspruch. Weltweit entfallen rund 71 % der Entnahmen auf die Landwirtschaft, vor allem auf die Bewässerung; Industrie und Energie nehmen rund 15 %, die Kommunen (Haushalte, Gewerbe) rund 13 % (FAO AQUASTAT, Jahr 2022). In Deutschland dagegen braucht die Landwirtschaft nur rund 2,5 % der Entnahme; den größten Teil entnehmen Energieversorgung sowie Bergbau und Industrie (Abbildung 104). Weil Bewässerungswasser größtenteils verdunstet, ist der Anteil der Landwirtschaft am echten Verbrauch weltweit noch höher als an der Entnahme.

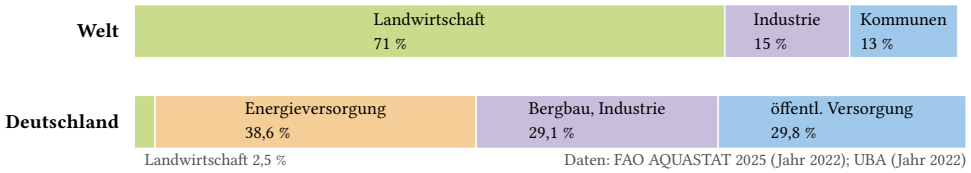


Abbildung 104: Wasserentnahme nach Sektoren, Anteile in Prozent. Weltweit dominiert die Bewässerungslandwirtschaft, in Deutschland die Energieversorgung (Kühlwasser) und die Industrie. Daten: FAO AQUASTAT 2025 (Jahr 2022), UBA (Jahr 2022: 17,9 Mrd. m³).

Ein Mensch in Deutschland gebraucht im Haushalt im Mittel 121 Liter Trinkwasser am Tag (BDEW, 2023), 1990 waren es noch rund 147 Liter. Davon dienen nur wenige Liter dem Trinken und Kochen, der Rest der Körperpflege, der Toilettenspülung und dem Wäschewaschen.

Viel mehr Wasser steckt in den Dingen, die wir kaufen. Das **virtuelle Wasser** ist die Wassermenge, die zur Herstellung eines Produkts nötig war; addiert man es für alle Produkte, die ein Mensch oder ein Land konsumiert, erhält man den **Wasserfußabdruck**. Für ein Kilogramm Rindfleisch werden im weltweiten Mittel etwa 15000 Liter angegeben, für ein Kilogramm Weizen etwa 1800 Liter, für ein Kilogramm Tomaten etwa 200 Liter (Water Footprint Network, Mekonnen und Hoekstra). Wer Tomaten aus Südspanien oder Avocados aus Chile importiert, importiert also Wasser aus Trockengebieten. Diese Rechnung ist umstritten: Regenwasser auf einer Weide (grünes Wasser) ist etwas anderes als Grundwasser zur Bewässerung (blaues Wasser). Für die Bewertung kommt es darauf an, **woher** das Wasser stammt und ob es dort knapp ist.

3.2 Wassergewinnung

Die **Wassergewinnung** umfasst alle Verfahren, mit denen Wasser für die Nutzung gefasst wird.

Verfahren	Vorteile	Probleme
Grundwasserbrunnen	gut geschützt, sauber, gleichmäßig verfügbar	Übernutzung senkt den Spiegel; an Küsten dringt Salzwasser ein; fossiles Grundwasser erneuert sich nicht
Quellfassung	kaum Aufbereitung nötig	schwankende Schüttung; im Karst anfällig für Verschmutzung
Uferfiltrat	Boden filtert Flusswasser natürlich	abhängig von der Qualität des Flusses
Seewasser (z. B. Bodensee)	große, gleichmäßige Menge	Aufbereitung nötig; Schutz des ganzen Sees
Talsperre, Stausee	speichert Wasser von der Regen- in die Trockenzeit; Energie	Umsiedlungen, Verdunstungsverluste, Sedimente, Konflikte mit Unterliegern
Fernwasserleitung	verteilt Wasser aus Überschuss- in Mangelgebiete	teuer; Abhängigkeit; Folgen im Entnahmegebiet
Meerwasserentsalzung	unbegrenzter Rohstoff Meerwasser	hoher Energiebedarf (Umkehrosmose etwa 3–4 kWh je m³), salzige Sole als Abfall
Abwasserwiederverwendung	Kreislauf statt Einweg; gut für Bewässerung	aufwendige Reinigung; Akzeptanz
Regenwassersammeln, Nebelnetze	dezentral, billig	kleine Mengen, abhängig vom Wetter

Tabelle 16: Verfahren der Wassergewinnung im Vergleich.

Beispiel 2

Wasser für Baden-Württemberg. Der Zweckverband Bodensee-Wasserversorgung entnimmt bei Sipplingen Wasser aus etwa 60 m Tiefe, bereitet es auf dem Sipplinger Berg auf und liefert es über ein Leitungsnetz bis in den Norden des Landes. Rund 320 Städte und Gemeinden mit etwa vier Millionen Menschen beziehen so Bodenseewasser, im Jahr rund 130 Mio. m³ (Angaben des Verbands). Eine zweite Fernwasserversorgung, die Landeswasserversorgung, fördert Grundwasser im Donauried. Fernwasser gleicht aus, dass die Region Stuttgart viele Menschen, aber nur geringe eigene Vorkommen hat. Der Bodensee wird dafür kaum merklich belastet: Die Entnahme ist im Vergleich zum Zufluss des Rheins sehr klein.

3.3 Wasserqualität

Wasser kann reichlich vorhanden und trotzdem unbrauchbar sein. Die **Wasserqualität** beschreibt die physikalischen, chemischen und biologischen Eigenschaften des Wassers im Hinblick auf eine Nutzung oder auf das Ökosystem: Temperatur, Salzgehalt, Sauerstoffgehalt, Nährstoffe (Nitrat, Phosphat), Schadstoffe (Pestizide, Schwermetalle, Arzneimittelreste, Mikroplastik) und Krankheitserreger.

- **Nitrat** gelangt vor allem aus der Düngung ins Grundwasser. In Gebieten mit viel Tierhaltung und Gemüsebau wird der Grenzwert der Trinkwasserverordnung von 50 mg je Liter an vielen Messstellen überschritten.
- **Eutrophierung:** Zu viele Nährstoffe lassen in Seen Algen wuchern; wenn sie absterben, verbraucht ihr Abbau Sauerstoff. Der Bodensee war in den 1970er Jahren stark überdüngt; durch Kläranlagen mit Phosphatfällung und phosphatfreie Waschmittel ist er heute wieder nährstoffarm.
- **Versalzung:** Übernutzte Küstengrundwasserleiter nehmen Meerwasser auf; Bewässerung ohne Entwässerung reichert Salze im Boden an (Kapitel 10).
- **Hygiene:** Weltweit hatten 2022 rund 2,2 Mrd. Menschen keinen Zugang zu sicher bewirtschaftetem Trinkwasser (WHO und UNICEF, JMP-Bericht 2024). Hier fehlt oft nicht das Wasser selbst, sondern Infrastruktur, Geld und Verwaltung: **ökonomische** Wasserknappheit im Unterschied zur **physischen**.

3.4 Wasserkonflikte und Übernutzung

Wo viele Nutzer auf eine knappe Ressource zugreifen, entstehen Konflikte: zwischen Landwirtschaft und Städten, zwischen Tourismus und Bevölkerung, zwischen Oberliegern und Unterliegern eines Flusses.

Beispiel 3

Der Aralsee. Um 1960 war der Aralsee mit etwa 68000 km² einer der größten Seen der Erde. Seit den 1960er Jahren wurde das Wasser seiner Zuflüsse Amu Darja und Syr Darja in der Sowjetunion großflächig für die Bewässerung von Baumwolle entnommen, über schlecht abgedichtete Kanäle mit großen Verlusten. Der See schrumpfte, 1987 zerfiel er in einen nördlichen und einen südlichen Teil; um 2004 bedeckte er nur noch etwa ein Viertel der früheren Fläche. Folgen: Zusammenbruch der Fischerei, versalzene und mit Pestiziden belastete Staubstürme vom trockengefallenen Seeboden, Gesundheitsschäden, ein kontinentaleres Klima in der Umgebung. Seit dem Bau des Kokaral-Damms (2005) steigt der Spiegel des Nordteils wieder; der Südteil ist weitgehend verloren.

Beispiel 4

Der Nil. Ägypten bezieht fast sein gesamtes Wasser aus dem Nil, dessen Wasser zum größten Teil aus dem Hochland von Äthiopien stammt (Blauer Nil). Seit Äthiopien den Grand Ethiopian Renaissance Dam (GERD) baute und ab 2020 schrittweise füllte, streiten Äthiopien (Strom, Entwicklung), Sudan und Ägypten (Sicherheit der Wasserversorgung) über Füllzeiten und Abgabemengen in Dürrejahren. Typisch für Konflikte an grenzüberschreitenden Flüssen: Der Oberlieger hat die Hand am Hahn, der Unterlieger trägt das Risiko.

Nachhaltige Wassernutzung setzt an mehreren Stellen an: am Bedarf (Tröpfchenbewässerung statt Furchenbewässerung, angepasste Kulturen, Wasser sparen in Haushalt und Industrie), am Dargebot (Grundwasserneubildung fördern, Entsiegelung, Speicher), an der Qualität (Kläranlagen, Gewässerschutz) und an der Verteilung (Wasserrechte, Preise, die Knappheit abbilden, Abkommen zwischen Anrainern). Leitbild ist die **integrierte Wasserbewirtschaftung** eines ganzen Flusseinzugsgebiets, wie sie die Europäische Wasserrahmenrichtlinie verlangt.

Fachbegriffe
Wasserbedarf: Wassermenge, die Haushalte, Landwirtschaft, Industrie oder Energie für ihre Zwecke benötigen
Wassergewinnung: Fassen von Wasser aus Grundwasser, Quellen, Flüssen, Seen, Meer (Entsalzung) oder Abwasser für die Nutzung
Wasserqualität: physikalische, chemische und biologische Beschaffenheit des Wassers im Hinblick auf Nutzung und Ökosystem
Wasserverbrauch: Wasser, das einem Gebiet durch Nutzung tatsächlich entzogen wird (Verdunstung, Einbau in Produkte); im Alltag oft gleichbedeutend mit Wassergebrauch

Üben: **noctua** ↗

4 Ökosysteme und ihre Verbreitung

BP 3.5.2.4 (1)

Wer im Flugzeug von Skandinavien nach Zentralafrika fliegt, sieht unter sich eine Abfolge von Landschaften: baumlose Tundra, endlose Nadelwälder, Laubwälder und Äcker, Grasländer, Wüste, Savanne, Regenwald. Dass diese Abfolge auf allen Kontinenten ähnlich wiederkehrt, liegt am Klima.

4.1 Was ist ein Ökosystem?

Ein **Ökosystem** ist ein Wirkungsgefüge aus Lebewesen (**Biozönose**) und ihrem unbelebten Lebensraum (**Biotop**) mit Klima, Relief, Gestein, Boden und Wasser. Seine Teile sind über **Energiefluss** und **Stoffkreisläufe** verbunden:

- **Produzenten** (grüne Pflanzen) bauen mit Sonnenenergie aus Kohlenstoffdioxid und Wasser organische Stoffe auf (Photosynthese). Die Menge pro Fläche und Jahr, die nach Abzug der eigenen Atmung übrig bleibt, heißt **Nettoprimärproduktion** (NPP).
- **Konsumenten** (Pflanzen- und Fleischfresser) leben von dieser Biomasse.
- **Destruenten** (Bodenlebewesen, Pilze, Bakterien) zersetzen abgestorbene Biomasse und machen die Nährstoffe wieder verfügbar (Kapitel 8).

Ökosysteme gibt es auf jeder Maßstabsebene, vom Tümpel bis zum ganzen borealen Nadelwald. Die großen, klimatisch bedingten Ökosysteme, die sich gürtelartig um die Erde ziehen, heißen **Ökozonen** oder **Vegetationszonen**. Weil sie vom Klima abhängen, nennt man sie **zonal**. Ökosysteme, die von örtlichen Sonderbedingungen bestimmt sind (Grundwasser in Flussauen, Gezeiten an Küsten, besonderes Gestein), heißen **azonal**.

4.2 Das Klima steuert die Verbreitung

Zwei Klimagrößen bestimmen, welche Pflanzen wo wachsen können:

a) **Wärme**: die Länge der Vegetationszeit (Zeit, in der es warm genug zum Wachsen ist) und die Kälte des Winters. Bäume brauchen einen Sommer, in dem der wärmste Monat im Mittel etwa 10 °C erreicht; deshalb fällt die polare Baumgrenze ungefähr mit der 10-°C-Juli-Isotherme zusammen.

b) **Wasser**: ob der Niederschlag die mögliche Verdunstung übersteigt (**humid**) oder nicht (**arid**), und wie viele Monate im Jahr humid sind. Im Klimadiagramm nach Walter und Lieth (Maßstab 10 °C entspricht 20 mm) ist ein Monat humid, wenn die Niederschlagskurve über der Temperaturkurve liegt.

Daraus ergibt sich eine Abfolge, die man auf einem Profil vom Pol zum Äquator schematisch darstellen kann (Abbildung 105). Zum Äquator hin nimmt die Wärme zu, die Feuchte hat zwei Maxima (Westwindzone und innere Tropen) und ein Minimum im Bereich der Wendekreise. Abbildung 106 zeigt dieselbe Ordnung in einem Diagramm aus Jahrestemperatur und Jahresniederschlag.

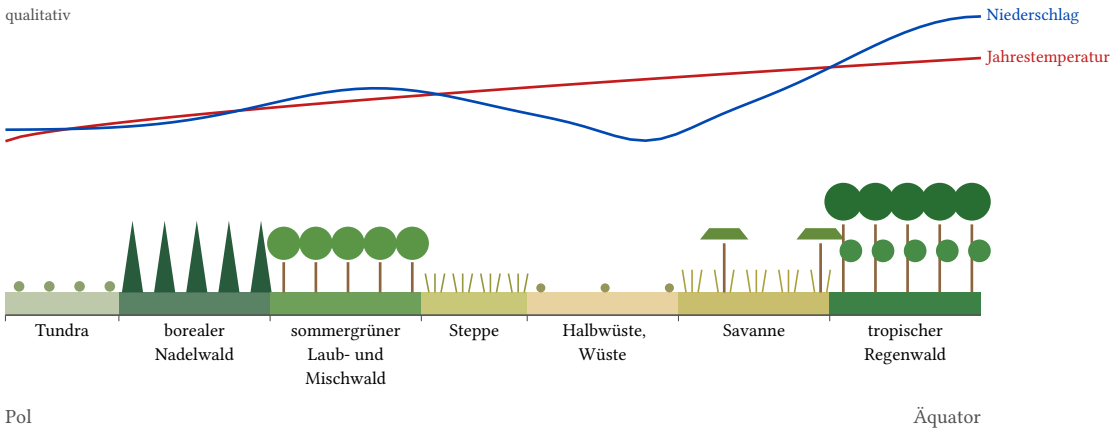


Abbildung 105: Abfolge der zonalen Ökosysteme auf einem schematischen Profil der Nordhalbkugel vom Pol zum Äquator, darüber der qualitative Verlauf von Jahrestemperatur und Niederschlag. Die Breiten der Zonen sind nicht maßstäblich; im Inneren der Kontinente liegen Steppen und Wüsten weiter polwärts, an den Westseiten der Kontinente in den Subtropen liegt das Hartlaubgebiet.

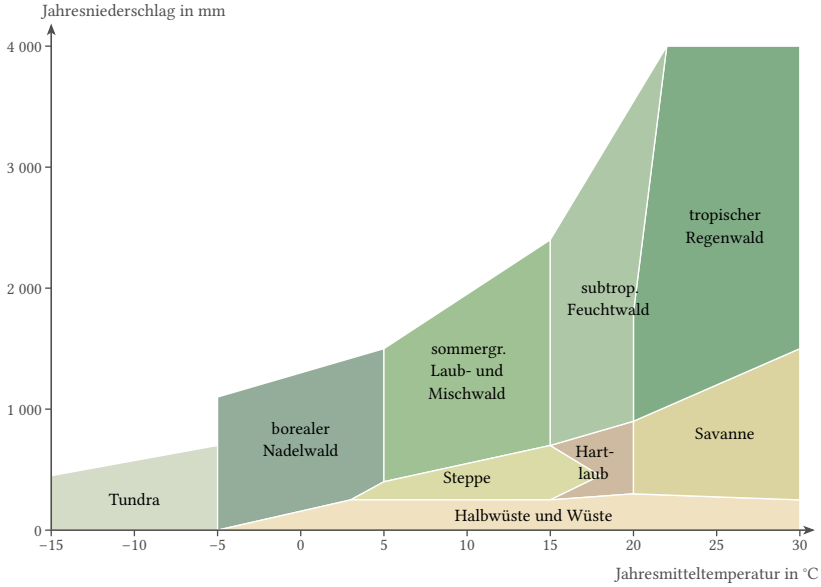


Abbildung 106: Zonale Ökosysteme im Klimaraum aus Jahresmitteltemperatur und Jahresniederschlag (schematisch, nach der Idee von Whittaker, eigene vereinfachte Grenzen). Steppe und Hartlaubgebiet liegen im Klimaraum nah beieinander; sie unterscheiden sich vor allem durch die Jahreszeit des Niederschlags (Sommerregen oder Winterregen) und die Wintertemperatur.

4.3 Die zonalen Ökosysteme im Überblick

Die folgende Übersicht geht vom Pol zum Äquator. Zu jeder Zone gehört ein Klimadiagramm einer Modellstation (Abbildung 107 und Abbildung 108); die Böden stehen in Kapitel 9, die Klimazonen selbst in GL3.

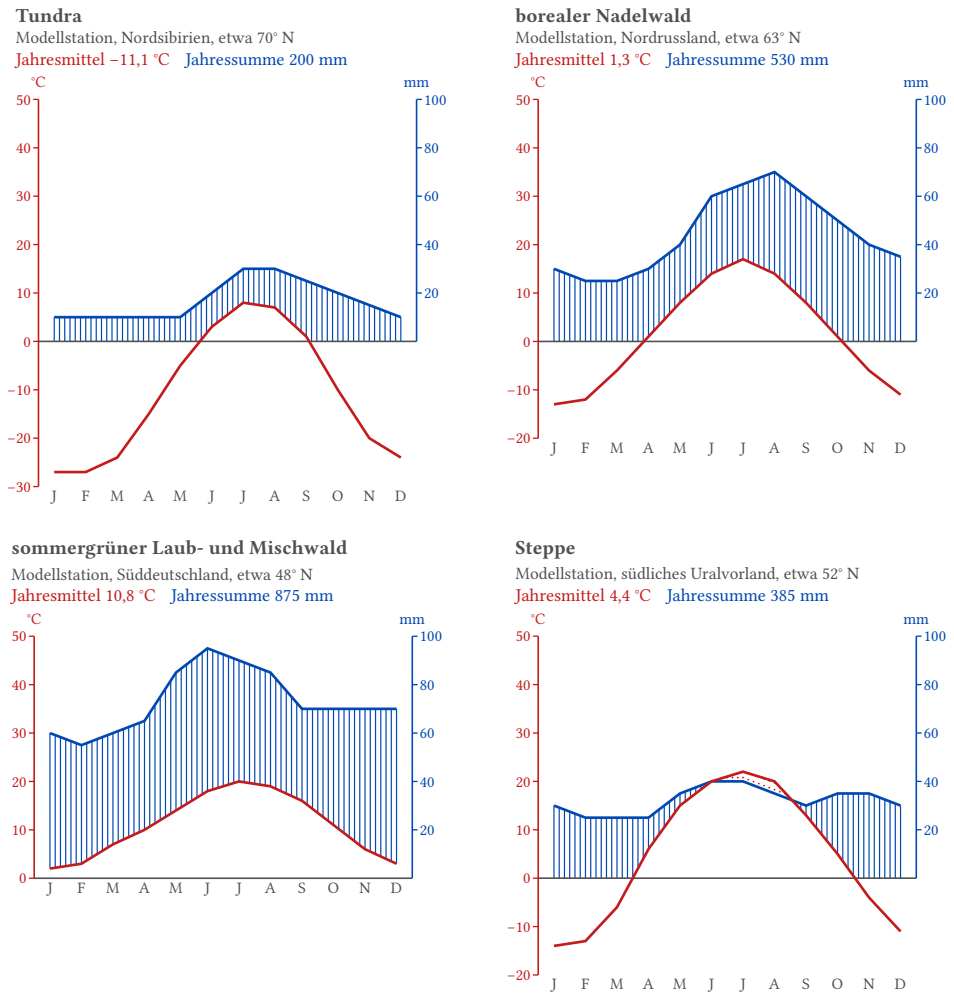


Abbildung 107: Klimadiagramme nach Walter und Lieth für vier Modellstationen der kalten und gemäßigten Zone (gerundete, typische Werte; an reale Stationen angelehnt). Temperatur rot, Niederschlag blau; senkrecht schraffiert: humid.

Tundra. Baumlose Vegetation jenseits der polaren Baumgrenze (und oberhalb der alpinen, Kapitel 5): Moose, Flechten, Gräser, Zwergsträucher wie Zwergbirke und Heidelbeere. Die Vegetationszeit dauert nur zwei bis drei Monate, der Untergrund ist oft dauerhaft gefroren (**Permafrost**). Im Sommer taut nur die oberste Schicht auf; weil das Schmelzwasser nicht versickern kann, entstehen trotz geringen Niederschlags (oft unter 300 mm) nasse Moore. Die Produktion ist gering, der Abbau der Streu noch langsamer: Tundraböden speichern große Mengen Kohlenstoff, die bei Erwärmung frei werden können (GL5).

borealer Nadelwald (Taiga). Die größte Waldzone der Erde zieht sich von Skandinavien über Sibirien bis Alaska und Kanada; sie umfasst etwa 27 % der Waldfläche der Welt (FAO, Global Forest Resources Assessment 2020). Lange, sehr kalte Winter, kurze, mäßig warme Sommer, eine Vegetationszeit von drei bis fünf Monaten. Wenige Baumarten (Fichte, Kiefer, Tanne, Lärche, Birke) dominieren. Nadelbäume sind angepasst: Sie können im Frühjahr sofort Photosynthese betreiben, ohne erst Blätter zu bilden; die schmalen, wachsüberzogenen Nadeln verdunsten im gefrorenen Winter wenig (Schutz vor Frosttrocknis). Die Lärche wirft ihre Nadeln ab und erträgt so die extremen Winter Ostsibiriens. Die saure, schwer zersetzbare Nadelstreu häuft sich als Rohhumus an (Podsol, Kapitel 9).

sommergrüner Laub- und Mischwald. Natürliche Vegetation fast ganz Mitteleuropas, Ostasiens und des Ostens der USA: Buchen, Eichen, Ahorn, Linden, in höheren Lagen und nach Osten gemischt mit Nadelbäumen. Vier Jahreszeiten, ganzjährig humid, Vegetationszeit vier bis sechs Monate. Die Bäume werfen im Herbst ihre großen, dünnen Blätter ab, weil sie im Winter bei gefrorenem Boden kein Wasser nachliefern könnten. Die Laubstreu wird von zahlreichen Bodenlebewesen gut zersetzt: Es entstehen fruchtbare Braunerden und Parabraunerden. In Mitteleuropa ist dieser Wald seit dem Mittelalter zum größten Teil gerodet und durch Äcker, Grünland, Siedlungen und Fichtenforste ersetzt.

Steppe. Baumloses Grasland im Inneren der Kontinente der gemäßigten Zone (Osteuropa und Zentralasien, Prärie in Nordamerika, Pampa in Argentinien, Puszta in Ungarn). Kalte Winter, heiße Sommer, 250 bis 500 mm Niederschlag mit Maximum im Frühsommer, danach Trockenheit. Für Bäume reicht das Wasser nicht, Gräser dagegen überstehen Kälte

und Dürre mit ihren unterirdischen Organen. Ihr dichtes Wurzelwerk liefert viel organische Substanz in den Boden, die im trockenen Sommer und kalten Winter nur langsam abgebaut wird: Unter der Steppe entsteht die Schwarzerde, einer der fruchtbarsten Böden der Erde (Kapitel 9 und 10). Die Steppen sind heute großenteils Weizen-, Mais- und Sonnenblumengebiete.

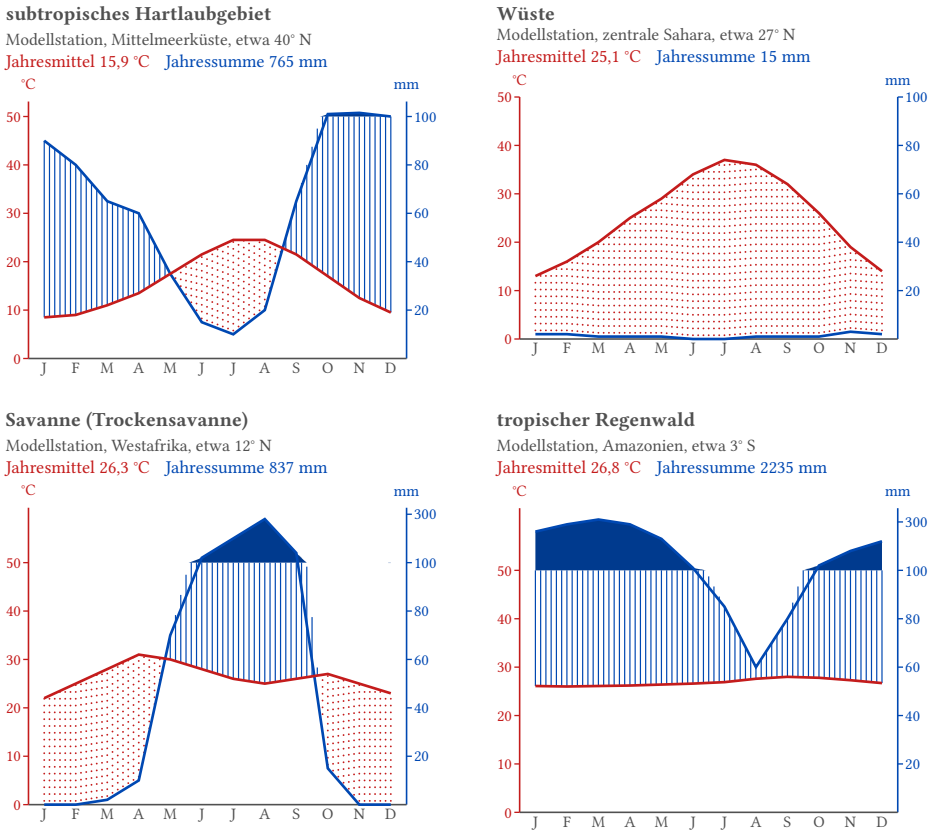


Abbildung 108: Klimadiagramme für vier Modellstationen der Subtropen und Tropen (gerundete, typische Werte; an reale Stationen angelehnt). Rot punktiert: arid; dunkelblau gefüllt: Monate über 100 mm (Maßstab dort 1 : 10).

subtropisches Hartlaubgewächs. An den Westseiten der Kontinente zwischen etwa 30° und 40° Breite liegt das Winterregengebiet: Im Sommer herrscht der subtropische Hochdruck mit Trockenheit, im Winter bringt die Westwinddrift Regen. Das gibt es an fünf Stellen der Erde: im Mittelmeerraum, in Kalifornien, in Mittelchile, im Kapland und im Südwesten und Süden Australiens. Die Pflanzen sind immergrün und haben kleine, harte, ledrige Blätter mit dicker Wachsschicht und eingesenkten Spaltöffnungen (**Hartlaub**, sklerophyll): Sie verdunsten im trockenen Sommer wenig und können im milden Winter weiter wachsen. Typisch sind Steineiche, Korkeiche, Ölbaum, Lorbeer und Zistrosen; viele Arten sind an Feuer angepasst (dicke Borke der Korkeiche, Wiederaustrieb aus dem Wurzelstock). Den Mittelmeerraum behandelt Kapitel 6.

Wüste und Halbwüste. Im Bereich der Wendekreise sinkt die Luft im subtropischen Hochdruckgürtel ab und erwärmt sich; Wolken lösen sich auf (GL3). Hier liegen die großen Wendekreiswüsten, dazu Binnenwüsten im Lee von Gebirgen und Küstenwüsten an kalten Meeresströmungen. In der **Wüste** fallen meist unter 100 bis 150 mm Niederschlag im Jahr, und das sehr unregelmäßig; alle Monate sind arid. Die Vegetation fehlt weitgehend oder beschränkt sich auf Rinnen (Wadis) und Oasen. In der **Halbwüste** (etwa 150 bis 250 mm) gibt es eine lückige Decke aus Sträuchern, Sukkulenten und kurzlebigen Pflanzen, die nach Regen in wenigen Wochen keimen, blühen und Samen bilden. Wüstenpflanzen sind Spezialisten: tiefe oder weit verzweigte Wurzeln, Wasserspeicher (Kakteen, Wolfsmilchgewächse), Blätter als Dornen oder ganz zurückgebildet.

Savanne. Zwischen Wüste und Regenwald liegt das tropische Grasland mit eingestreuten Bäumen und Sträuchern. Es hat eine Regenzeit im Sommer, wenn die innertropische Konvergenzzone (ITC) über ihm steht, und eine Trockenzeit im Winter. Je nach Zahl der humiden Monate unterscheidet man:

- **Feuchtsavanne** (etwa 7 bis 9,5 humide Monate): hohes Gras, Galeriewälder an Flüssen, viele Bäume;
- **Trockensavanne** (etwa 4,5 bis 7 humide Monate): Gras bis Mannshöhe, Schirmakazien, Affenbrotbäume (Baobab);
- **Dornsavanne** (etwa 2 bis 4,5 humide Monate): niedriges, lückiges Gras, Dornsträucher, Übergang zur Halbwüste. Hierzu gehört die Sahelzone (Kapitel 7).

Gras und Bäume konkurrieren um Wasser; Feuer, Wildtiere und Weidevieh halten die Savanne offen. Viele Bäume werfen in der Trockenzeit das Laub ab.

tropischer Regenwald. Im Bereich des Äquators (Amazonien, Kongobecken, Südostasien) ist es das ganze Jahr warm (etwa 25 bis 28 °C) und feucht (1800 bis über 4000 mm, mindestens 9,5 humide Monate). Es herrscht **Tageszeitenklima**: Der Unterschied zwischen Tag und Nacht ist größer als der zwischen den Monaten. Unter diesen Bedingungen gibt es keine Ruhezeit, die Pflanzen wachsen und blühen das ganze Jahr. Der Regenwald hat die höchste Artenvielfalt aller Ökosysteme und einen **Stockwerkbau** aus Kraut- und Strauchschicht, mehreren Baumschichten und einzelnen Überständern bis 60 m; Brettwurzeln stützen die flach wurzelnden Riesen, Lianen und Epiphyten (Aufsitzerpflanzen) streben zum Licht. Die Produktion ist die höchste aller Landökosysteme (Abbildung 109), trotzdem sind die Böden arm: Die Nährstoffe stecken fast ganz in der lebenden Biomasse und werden in einem kurzgeschlossenen Kreislauf sofort wieder aufgenommen (Abbildung 110, ausführlich in Kapitel 9 und 10).

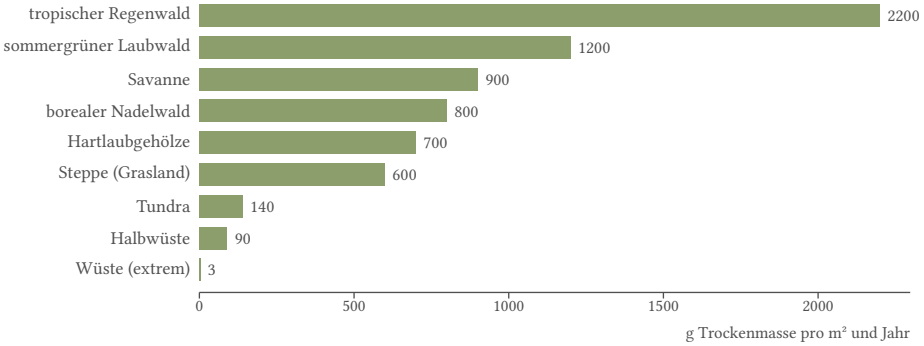


Abbildung 109: Nettoprimärproduktion ausgewählter Ökosysteme (Mittelwerte, g Trockenmasse pro m² und Jahr). Daten: Whittaker und Likens 1975, gerundet.

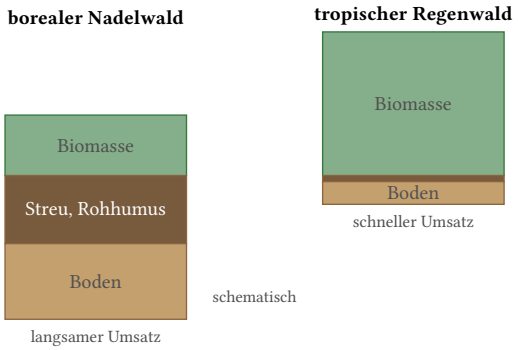


Abbildung 110: Wo die Nährstoffe gespeichert sind (schematisch): Im borealen Nadelwald liegt ein großer Teil in Streu, Rohhumus und Boden, weil die Zersetzung langsam ist. Im tropischen Regenwald steckt der größte Teil in der Biomasse; Streu wird in Wochen zersetzt, der Boden selbst ist nährstoffarm.

4.4 Ein azonales Ökosystem: die Mangrove

Die **Mangrove** ist ein Wald aus salztoleranten Bäumen und Sträuchern im Gezeitenbereich tropischer und subtropischer Flachküsten, vor allem an geschützten Buchten und Flussmündungen (Sundarbans im Ganges-Brahmaputra-Delta, Küsten Indonesiens, Brasiliens, Westafrikas). Sie ist azonal, weil nicht das Großklima, sondern Gezeiten und Salzwasser sie bestimmen; die tropische Wärme ist nur Voraussetzung. Weltweit bedecken Mangroven etwa 150000 km² (Global Mangrove Watch, um 2020).

Mangrovenbäume haben besondere Anpassungen: **Stelzwurzeln** geben im schlammigen Boden Halt, **Atemwurzeln** (Pneumatophoren) ragen aus dem sauerstoffarmen Schlick, Salz wird an den Wurzeln abgehalten oder über Drüsen der Blätter ausgeschieden. Viele Arten sind **lebendgebärend**: Der Keimling wächst noch am Baum aus und fällt dann in den Schlick oder treibt im Meer davon.

Mangroven sind ökologisch sehr wertvoll. Sie bremsen Wellen und Sturmfluten (Küstenschutz), halten Sediment fest, dienen vielen Fischen und Garnelen als Kinderstube und speichern im Schlick große Mengen Kohlenstoff (**Blue Carbon**). Bedroht sind sie durch die Umwandlung in Garnelenzuchtteiche und Reisfelder, durch Holzeinschlag, Küstenbebauung und den Meeresspiegelanstieg.

Merksatz

Die Verbreitung der zonalen Ökosysteme folgt dem Klima: Die Wärme nimmt vom Äquator zu den Polen ab, die Feuchte hat Maxima in den inneren Tropen und in der Westwindzone und ein Minimum bei den Wendekreisen. Azonale Ökosysteme wie die Mangrove hängen von örtlichen Bedingungen ab. Hohe Produktion bedeutet nicht fruchtbaren Boden: Entscheidend ist, wo die Nährstoffe gespeichert sind.

Fachbegriffe

borealer Nadelwald: Waldzone der kalt-gemäßigten Breiten mit langen Wintern; wenige Nadelbaumarten, Rohhumus, Podsole
Halbwüste: Übergang zur Wüste mit lückiger Strauch- und Sukkulentenvegetation, etwa 150 bis 250 mm Niederschlag
Mangrove: azonaler Wald aus salztoleranten Gehölzen im Gezeitenbereich tropischer Küsten, mit Stelz- und Atemwurzeln
Savanne: tropisches Grasland mit Bäumen, Sommerregen und Trockenzeit; Feucht-, Trocken- und Dornsavanne
sommergrüner Laub- und Mischwald: Wald der feucht-gemäßigten Zone, der im Winter das Laub abwirft; natürliche Vegetation Mitteleuropas
Steppe: baumloses Grasland der kontinentalen gemäßigten Zone mit Sommertrockenheit; Schwarzerde
subtropisches Hartlaubgewächs: immergrüne Pflanzen mit kleinen, harten Blättern in Winterregengebieten (Mittelmeerraum, Kalifornien …)
tropischer Regenwald: immerfeuchter, artenreicher Wald der inneren Tropen mit Stockwerkbau und kurzgeschlossenem Nährstoffkreislauf
Tundra: baumlose Vegetation aus Moosen, Flechten und Zwergsträuchern jenseits der Baumgrenze, oft auf Permafrost
Wüste: Gebiet mit ganzjährig aridem Klima und fehlender oder sehr spärlicher Vegetation

Üben: **noctua** ↗ Ausprobieren: **Klimadiagramm-Baukasten** ↗

5 Relief und Höhenlage: Höhenstufen

BP 3.5.2.4 (1)

Die Klimazonen gelten für das Flachland. Im Gebirge ändern sich die Bedingungen auf wenigen Kilometern so stark wie sonst auf Tausenden: Wer den Kilimandscharo besteigt, wandert vom Savannenrand durch Bergregenwald, Heidevegetation und alpine Wüste bis zu den Gletschern.

5.1 Warum sich die Vegetation mit der Höhe ändert

Mit zunehmender Höhe nimmt die Lufttemperatur im Mittel um etwa 0,6 K je 100 m ab (GL3). Damit wird die Vegetationszeit kürzer, Frost häufiger, und oberhalb einer bestimmten Höhe reicht die Wärme nicht mehr für Bäume (**Baumgrenze**) und schließlich nicht einmal mehr, um den Winterschnee im Sommer wegzuschmelzen (**Schneegrenze**). Zugleich steigt der Niederschlag bis in mittlere Höhen an, weil Luft am Gebirge aufsteigt und abregnet (Steigungsregen). Auch die Strahlung wird mit der Höhe intensiver, der Wind stärker, die Böden flachgründiger.

Die Vegetation ordnet sich deshalb in übereinanderliegenden Gürteln an. Eine **Höhenstufe** ist ein solcher Gürtel mit ähnlichen klimatischen Bedingungen, ähnlicher natürlicher Vegetation und ähnlicher Nutzung. Weil die Abfolge der Höhenstufen in jedem Gebirge vom Klima am Gebirgsfuß ausgeht, sieht sie in den Alpen anders aus als in den Anden (Abbildung 111).

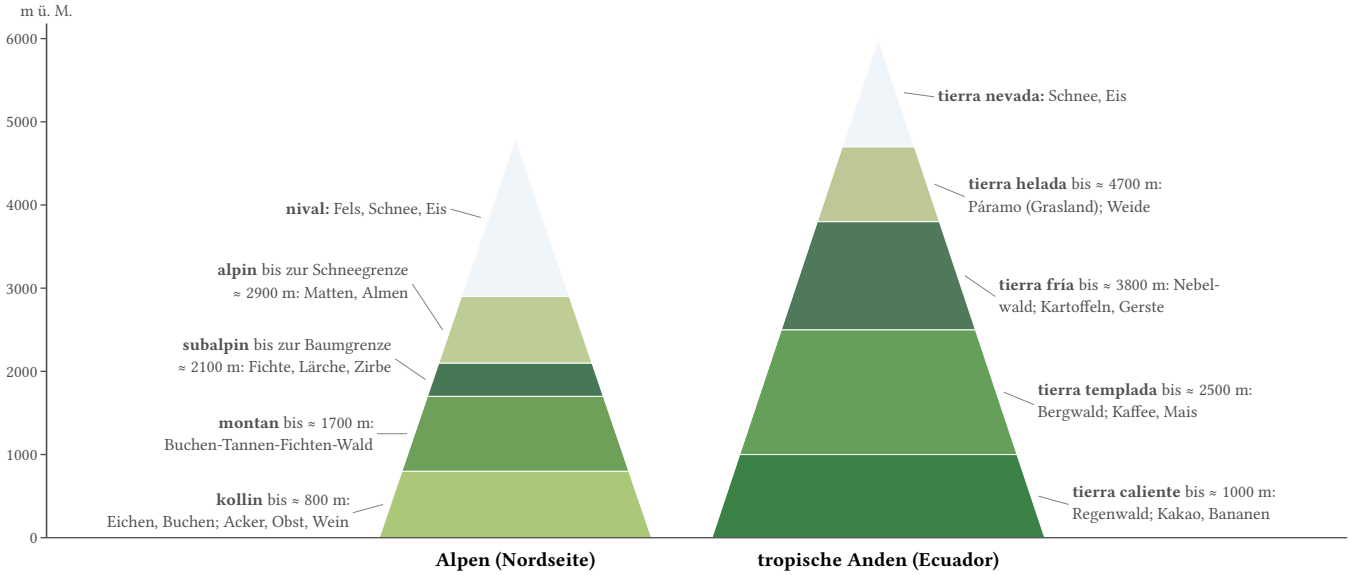


Abbildung 111: Höhenstufen der Vegetation und Nutzung in den Alpen (Nordseite) und in den tropischen Anden Ecuadors (schematisch, Höhengrenzen gerundet; sie schwanken je nach Lage um mehrere Hundert Meter).

5.2 Die Alpen

In den Alpen unterscheidet man an der Nordseite:

- **kolline Stufe** (Hügelland, bis etwa 800 m): Eichen- und Buchenwälder, heute Ackerbau, Obst und an Südhängen Wein;
- **montane Stufe** (bis etwa 1600 bis 1800 m): Buchen-Tannen-Wälder, nach oben Fichte; Grünlandwirtschaft;
- **subalpine Stufe** (bis zur Baumgrenze bei etwa 1900 bis 2200 m): Fichte, Lärche und Zirbe, oben Latschen (Bergkiefern) und Zwergsträucher;
- **alpine Stufe** (bis zur Schneegrenze bei etwa 2800 m): Matten aus Gräsern und Polsterpflanzen; Almen für das Vieh im Sommer;
- **nivale Stufe**: Fels, Schnee und Gletscher.

In den Zentralalpen liegen alle Grenzen höher als am Nordrand. Das liegt am **Massenerhebungseffekt**: Große, hohe Gebirgsmassen heizen sich stärker auf als einzelne Berge, und die inneralpinen Täler sind trockener und sonniger.

5.3 Die tropischen Anden

In den Tropen ist es am Gebirgsfuß das ganze Jahr heiß; die Höhenstufen sind deshalb nach der Temperatur benannt (spanisch *tierra*, Land):

- **tierra caliente** (heißes Land, bis etwa 1000 m): Regenwald; Kakao, Bananen, Zuckerrohr;
- **tierra templada** (gemäßigtes Land, bis etwa 2500 m): Bergwald; Kaffee, Mais; angenehmes Klima, viele Städte;
- **tierra fría** (kaltes Land, bis etwa 3800 m): Nebelwald, Baumgrenze bei etwa 3500 bis 3900 m; Kartoffeln, Gerste; Quito liegt auf etwa 2850 m;
- **tierra helada** (eisiges Land, bis etwa 4700 m): Páramo, ein feuchtes Grasland mit Schopfrosettenpflanzen; Weide für Lamas und Schafe;
- **tierra nevada** (Schneeland): Fels, Schnee und Gletscher.

In den Tropen liegen Baum- und Schneegrenze fast doppelt so hoch wie in den Alpen, weil es am Fuß des Gebirges wärmer ist. Wegen des Tageszeitenklimas gibt es dort oben keinen Winter, sondern fast jede Nacht Frost und jeden Tag Tauwetter („Sommer jeden Tag, Winter jede Nacht“).

5.4 Weitere Einflüsse des Reliefs

- **Luv und Lee:** Auf der dem Wind zugewandten Seite (Luv) steigt Luft auf, kühlt ab und regnet ab; auf der abgewandten Seite (Lee) sinkt sie ab, erwärmt sich und ist trocken (Abbildung 112). So liegen die regenreichen Hochvogesen und das trockene Colmar im Lee nebeneinander; in größerem Maßstab entstehen Binnenwüsten im Lee hoher Gebirge (Patagonien östlich der Anden).
- **Exposition:** Südhänge bekommen auf der Nordhalbkugel mehr Sonnenstrahlung als Nordhänge. Deshalb liegt die Waldgrenze an Südhängen höher, und Weinberge liegen an Südhängen.
- **Inversion und Kaltluftseen:** In Becken und Tälern sammelt sich nachts kalte Luft; Frost ist dort häufiger als am Hang (Frostschäden im Talboden, Obstbau am Hang).
- **Relief und Wasser:** In Senken und Auen steht Grundwasser hoch; dort wachsen azonale Auen- und Bruchwälder oder Moore statt des zonalen Waldes (Gley, Kapitel 9). Auf Kuppen und Steilhängen sind die Böden flachgründig und trocken.

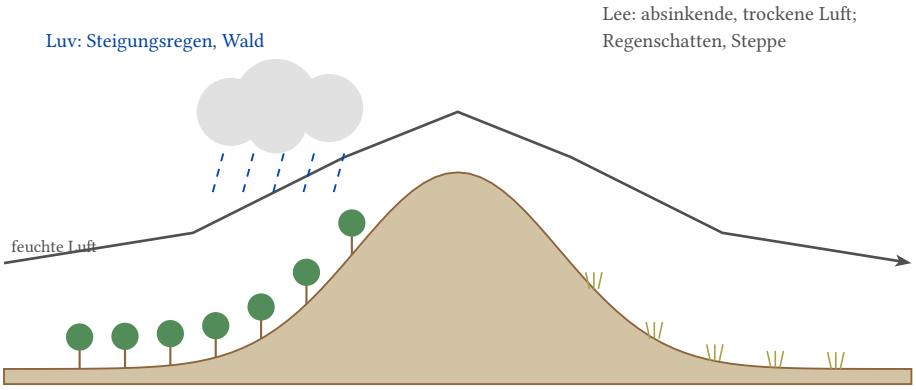


Abbildung 112: Luv und Lee eines Gebirges (schematisch): Steigungsregen und Wald auf der Luvseite, Regenschatten und Steppe auf der Leeseite.

Fachbegriffe
Höhenstufe: Gürtel im Gebirge mit ähnlichem Klima, ähnlicher natürlicher Vegetation und Nutzung; die Abfolge hängt von der Klimazone am Gebirgsfuß ab

Üben: **noctua** ↗

6 Mittelmeerraum: Eingriffe und Nachhaltigkeit

BP 3.5.2.4 (2)

Wahlpflicht: Der Bildungsplan verlangt Mittelmeerraum **oder** Sahelzone. Dieses Kapitel behandelt den Mittelmeerraum, Kapitel 7 die Sahelzone.

Wer heute durch Südfrankreich, Südspanien oder Griechenland fährt, sieht selten einen geschlossenen Wald. Stattdessen prägen Gebüsch, Zwergsträucher, kahle Kalkhänge, Olivenhaine und Gewächshäuser die Landschaft. Das ist nicht der Naturzustand, sondern das Ergebnis von Jahrtausenden menschlicher Nutzung.

6.1 Naturraum

Der Mittelmeerraum hat Winterregenklima (Abbildung 108): heiße, trockene Sommer mit zwei bis fünf ariden Monaten, milde, feuchte Winter. Die Niederschläge nehmen von Nordwesten (Norditalien, Kroatien über 1000 mm) nach Südosten (Südostspanien, Libyen, Ägypten unter 300 mm) ab und fallen oft als Starkregen im Herbst. Das Relief ist gebirgig, die Hänge sind steil, die Gesteine häufig Kalk. Die natürliche Vegetation wären immergrüne Hartlaubwälder aus Steineiche, Korkeiche und Aleppokiefer, in höheren Lagen sommergrüne Eichen- und Nadelwälder.

6.2 Wildpflanzen und Kulturpflanzen

Eine **Wildpflanze** wächst ohne Zutun des Menschen und wurde nicht gezielt verändert. Eine **Kulturpflanze** ist durch Auslese und Züchtung aus Wildpflanzen hervorgegangen und wird vom Menschen angebaut; sie unterscheidet sich von ihrer Wildform etwa durch größere Früchte, Samen, die nicht mehr von selbst ausfallen, oder weniger Bitterstoffe.

Der Mittelmeerraum liegt nahe am „Fruchtbaren Halbmond“ Vorderasiens, wo Weizen, Gerste, Linsen, Erbsen, Ziegen und Schafe vor mehr als 10000 Jahren domestiziert wurden. Aus der Wildform des Ölbaums (Oleaster) wurde die Olive, aus der Wildrebe die Weinrebe. Später kamen Kulturpflanzen aus anderen Erdteilen dazu: Zitrusfrüchte aus Süd- und Ostasien, Reis über die Araber, Tomaten, Paprika und Mais aus Amerika. Die klassische **mediterrane Trias** aus Getreide, Ölbaum und Wein ist an das Klima angepasst: Weizen wächst im feuchten Winter und reift vor der Sommerdürre, Ölbaum und Rebe erreichen mit tiefen Wurzeln Wasser im Untergrund.

6.3 Eingriffe in das Ökosystem

Die **landwirtschaftliche Nutzung** ist die Erzeugung pflanzlicher und tierischer Produkte auf Acker-, Dauerkultur- und Weideland. Die **forstwirtschaftliche Nutzung** ist die Nutzung und Pflege von Wäldern zur Holzgewinnung und für weitere Waldfunktionen. Im Mittelmeerraum haben beide die Landschaft tief verändert.

- **Rodung und Holzeinschlag:** Seit der Antike wurden Wälder für Ackerland, Bauholz, Schiffbau (Flotten der Griechen, Römer, Venezianer) und Brennholz (Erzverhüttung, Kalkbrennen, Töpferei) gerodet.
- **Beweidung:** Ziegen und Schafe fressen junge Triebe und Keimlinge und verhindern, dass Wald nachwächst. Hirten brannten Gebüsch ab, um frische Weide zu bekommen.
- **Bodenerosion:** Ohne schützende Pflanzendecke spülen die Starkregen im Herbst den Boden von den steilen Hängen. Er sammelt sich in Tälern und Deltas; antike Hafenstädte wie Ephesos liegen heute kilometerweit im Landesinneren.
- **Brände:** Hartlaubvegetation brennt im trockenen Sommer leicht. Natürliche Brände gehörten schon immer dazu, aber heute entstehen die meisten durch Menschen (Fahrlässigkeit, Brandstiftung). Aufgegebene Felder verbuschen, die Brandlast steigt, Hitzewellen werden durch den Klimawandel häufiger: 2023 wütete im Nordosten Griechenlands der größte Waldbrand, der in der EU bisher erfasst wurde.

Das Ergebnis ist eine **Degradation**, also eine Verschlechterung des Ökosystems in seiner Zusammensetzung, seiner Produktivität und seinen Leistungen. Sie verläuft in Stufen (Abbildung 113):

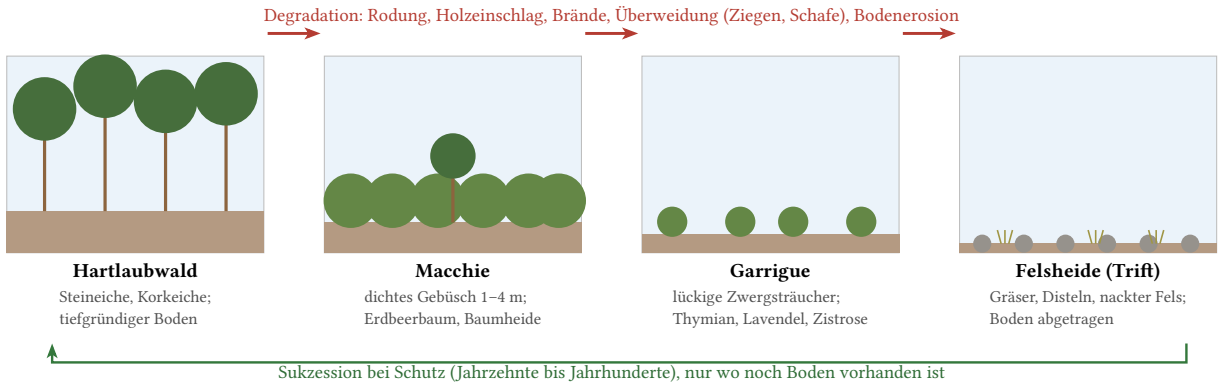


Abbildung 113: Degradationsreihe der Vegetation im Mittelmeerraum (schematisch). Mit jeder Stufe wird die Vegetation niedriger und lückiger, der Boden dünner. Bei Schutz kann sich die Vegetation über Sukzession erholen, aber nur, solange noch Boden vorhanden ist.

- **Macchie** (italienisch macchia): dichtes, oft undurchdringliches Hartlaubgebüsch aus Erdbeerbaum, Baumheide, Myrte, Mastixstrauch und Kermeseiche, 1 bis 4 m hoch; auf noch recht tiefgründigen Böden.
- **Garrigue** (in Griechenland Phrygana, in Spanien Tomillares): lückige, kniehohe Zwergstrauchheide aus duftenden Lippenblütlern wie Thymian, Rosmarin und Lavendel und aus Zistrosen; auf flachgründigen, steinigen Böden, meist über Kalk.
- **Felsheide** und **Trift**: Gräser, Disteln und Zwiebelpflanzen zwischen nacktem Fels. Der Boden ist weitgehend abgetragen.

Sukzession heißt die natürliche Abfolge von Pflanzengesellschaften an einem Standort, wenn die Störung aufhört: Auf aufgegebenem Land folgen Gräser und Kräuter, Zwergsträucher, Gebüsch und schließlich wieder Wald. Im Mittelmeerraum ist das heute vielerorts zu beobachten, weil Bergdörfer verlassen und Weiden aufgegeben werden. Wo der Boden aber einmal abgetragen ist, kommt der Wald für Jahrhunderte nicht zurück: Die Degradation ist dann praktisch nicht umkehrbar.

6.4 Moderne Nutzung: Bewässerung, Gewächshäuser, Tourismus

Seit den 1960er Jahren hat sich die Nutzung grundlegend gewandelt. Im Landesinneren werden Hänge aufgegeben, an den Küsten wird die Nutzung intensiviert.

Beispiel 5

Das „Plastikmeer“ von Almería. Im Südosten Spaniens, in einem der trockensten Gebiete Europas (gut 200 mm Niederschlag im Jahr), liegen auf dem Campo de Dalías und um Níjar Gewächshäuser aus Kunststofffolie, die man vom Weltraum aus sieht; allein im Campo de Dalías waren es 2021 rund 22000 ha (Junta de Andalucía), in der ganzen Provinz über 30000 ha. Hier wachsen im Winter Tomaten, Paprika, Gurken und Zucchini für ganz Europa. Grundlage sind Wärme, Sonne, billige Arbeitskräfte (oft Migranten unter schwierigen Bedingungen) und Grundwasser. Die Folgen: Der Grundwasserleiter des Campo de Dalías wurde schon 1995 offiziell als übernutzt erklärt; der Spiegel sinkt, an der Küste dringt Meerwasser ein, das Wasser versalzt. Dünger belastet das Grundwasser mit Nitrat, Folienabfälle landen in der Umwelt. Seit einigen Jahren werden Meerwasserentsalzung, gereinigtes Abwasser und computergesteuerte Tröpfchenbewässerung eingesetzt; die Wassereffizienz pro Kilogramm Gemüse ist hoch, aber die Fläche wächst weiter.

Hinzu kommt der Tourismus: Hotels, Golfplätze und Swimmingpools brauchen Wasser genau im trockenen Sommer, wenn auch die Landwirtschaft am meisten bewässert. Große Wasserüberleitungen wie die vom Tajo zum Segura in Spanien verlagern den Konflikt in andere Regionen. Der Klimawandel verschärft die Lage: Für den Mittelmeerraum erwarten die Modelle weniger Niederschlag, mehr Verdunstung und mehr Dürren (GL5).

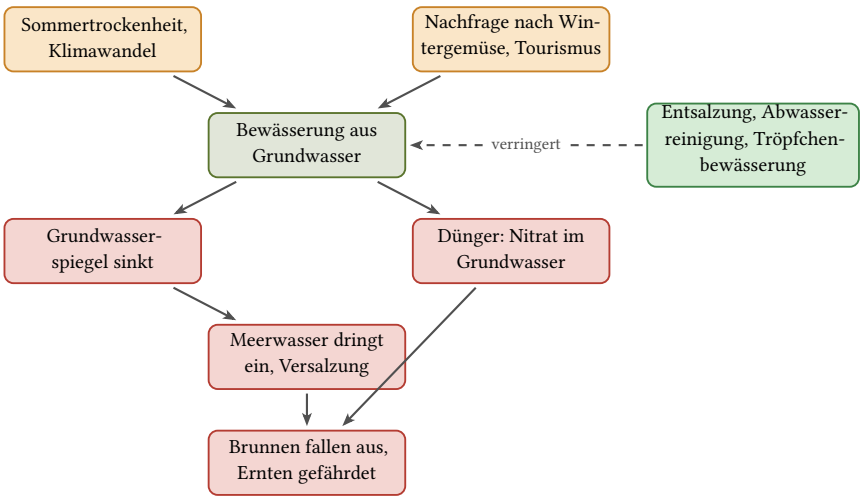


Abbildung 114: Wirkungsgefüge Wassernutzung im Gewächshausanbau Südostspaniens (vereinfacht). Gestrichelt: Wirkung von Gegenmaßnahmen.

6.5 Konzepte einer nachhaltigen Nutzung

Nachhaltig ist eine Nutzung, die ökologisch tragfähig, wirtschaftlich tragfähig und sozial gerecht ist und die Möglichkeiten künftiger Generationen nicht einschränkt. Für den Mittelmeerraum werden diskutiert:

- **Agroforstsysteme** nach dem Vorbild der **Dehesa** (Spanien) und des **Montado** (Portugal): lichte Haine aus Kork- und Steineichen, darunter Weide für Schweine, Rinder und Schafe oder Getreide. Kork wird etwa alle neun bis zwölf Jahre geschält, ohne den Baum zu fällen; die Eicheln mästen die iberischen Schweine. Das System ist seit Jahrhunderten stabil, artenreich und schützt den Boden, ist aber durch Überalterung der Bäume und Aufgabe der Bewirtschaftung bedroht.
- **Wassersparende Bewässerung** (Tröpfchen, Bodenfeuchtesensoren), **Wiederverwendung** gereinigten Abwassers, Preise und Quoten für Grundwasser, Schließen illegaler Brunnen.
- **Erosionsschutz:** Terrassen pflegen, Boden zwischen Olivenbäumen und Reben begrünen statt blank zu halten, entlang der Höhenlinien pflügen.
- **Brandvorsorge:** ein Mosaik aus bewirtschafteten Flächen, Weiden und Wald, Brandschneisen, gezielte Beweidung, Aufforstung mit standortgerechten Laubbäumen statt mit leicht brennbaren Kiefern- und Eukalyptusplantagen.
- **Tourismus:** Wasserpreise, sparsame Hotels, keine neuen Golfplätze in Trockengebieten, Entzerrung der Saison.

Fachbegriffe
Degradation: Verschlechterung eines Ökosystems in Vegetation, Boden und Leistungen durch menschliche Eingriffe; im Mittelmeerraum vom Hartlaubwald über Macchie und Garrigue zur Felsheide
forstwirtschaftliche Nutzung: Nutzung und Pflege von Wäldern zur Holzgewinnung (auch Kork) und für weitere Waldfunktionen
Kulturpflanze: durch Auslese und Züchtung aus Wildpflanzen entstandene, vom Menschen angebaute Pflanze (Weizen, Olive, Rebe)
landwirtschaftliche Nutzung: Erzeugung pflanzlicher und tierischer Produkte auf Acker-, Dauerkultur- und Weideland
Sukzession: natürliche Abfolge von Pflanzengesellschaften nach dem Ende einer Störung bis zu einem stabilen Endstadium
Wildpflanze: ohne Zutun des Menschen wachsende, nicht gezüchtete Pflanze, oft Stammform einer Kulturpflanze (Oleaster)

Üben: **noctua** ↗

7 Sahelzone: Desertifikation und Nachhaltigkeit

BP 3.5.2.4 (2)

Wahlpflicht: Der Bildungsplan verlangt Mittelmeerraum **oder** Sahelzone. Dieses Kapitel behandelt die Sahelzone, Kapitel 6 den Mittelmeerraum.

„Sahel“ kommt vom arabischen Wort für Ufer: Für die Karawanen, die die Sahara durchquerten, war der Südrand der Wüste das rettende Ufer. Heute steht der Name für einen Raum, in dem sich die Wechselwirkung zwischen Klima, Ökosystem und menschlicher Nutzung besonders deutlich zeigt.

7.1 Lage und Klima

Die Sahelzone ist ein mehrere Hundert Kilometer breiter Streifen, der sich südlich der Sahara vom Atlantik (Senegal, Mauretanien) über Mali, Burkina Faso, Niger und Tschad bis in den Sudan zieht, etwa zwischen 13° und 18° nördlicher Breite. Sie wird meist über den Jahresniederschlag abgegrenzt: zwischen etwa 150 bis 200 mm im Norden und 600 mm im Süden (Abbildung 115). Nach Süden folgt die Sudanzone (Trockensavanne).

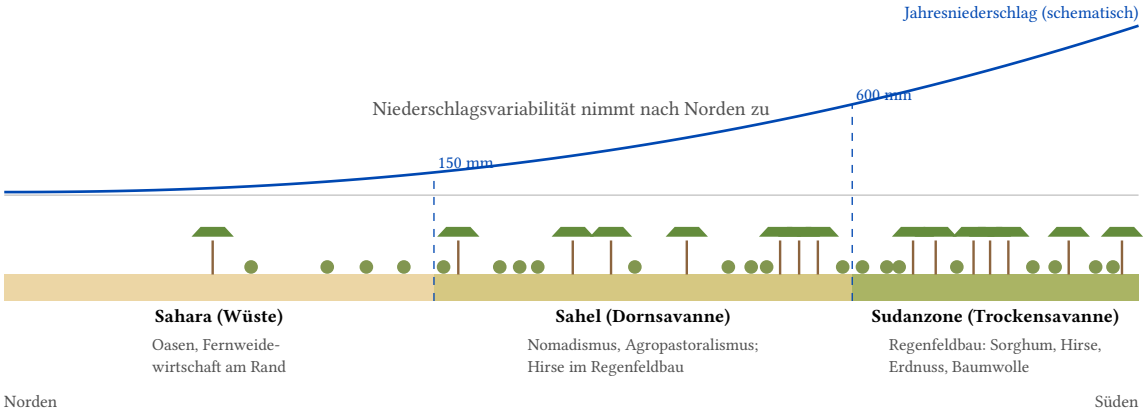


Abbildung 115: Schematisches Nord-Süd-Profil von der Sahara über den Sahel in die Sudanzone mit Jahresniederschlag, Vegetation und Nutzung (nicht maßstäblich).

Der Regen kommt nur in wenigen Sommermonaten, wenn die ITC mit dem feuchten Südwestmonsun ihre nördlichste Lage erreicht (Abbildung 116). Je weiter nördlich, desto kürzer die Regenzeit und desto unsicherer der Regen. Das Kennzeichen des Sahel ist die große **Variabilität**: Von einem Jahr zum nächsten kann der Niederschlag um mehr als ein Drittel schwanken, und auch innerhalb der Regenzeit gibt es lange Trockenpausen. Auf eine sehr feuchte Phase in den 1950er und 1960er Jahren folgten die großen Dürren um 1970 bis 1973 und 1983 bis 1985 mit Hungersnöten und dem Verlust großer Teile der Viehherden. Seit den 1990er Jahren hat sich der Niederschlag teilweise erholt, die Regen fallen aber häufiger als Starkregen.

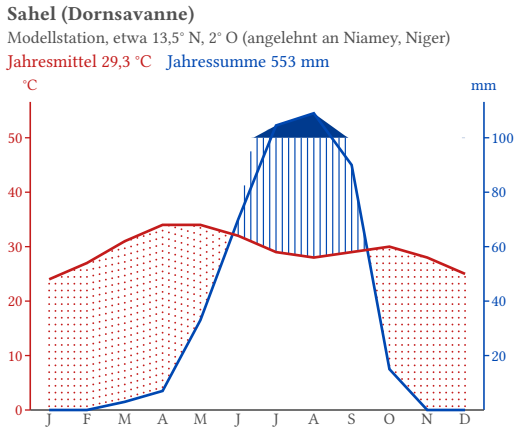


Abbildung 116: Klimadiagramm einer Modellstation im südlichen Sahel (gerundete, typische Werte). Vier humide Monate (der Juni nur knapp) stehen acht ariden gegenüber.

7.2 Traditionelle Nutzung

Die Menschen haben sich über Jahrhunderte an das unsichere Klima angepasst:

- **Nomadismus** und **Transhumanz** im Norden: Hirten (etwa Tuareg, Fulbe) ziehen mit Rindern, Kamelen, Schafen und Ziegen dem Regen und der Weide nach, in der Regenzeit nach Norden, in der Trockenzeit nach Süden. Die Mobilität verteilt die Weidebelastung über große Flächen.
- **Regenfeldbau** im Süden: Ackerbauern bauen Hirse (Perlhirse ist besonders dürrefest) und Sorghum an, dazu Erdnüsse und Bohnen. Nach einigen Jahren Anbau ließ man das Land brachliegen, damit sich Boden und Vegetation erholten (**Landwechselwirtschaft**).
- Zwischen beiden gab es Austausch: Das Vieh der Hirten weidete nach der Ernte auf den Feldern und düngte sie, die Bauern lieferten Getreide.

7.3 Desertifikation

Desertifikation bedeutet nach der Definition der UN-Konvention zur Bekämpfung der Wüstenbildung (UNCCD, 1994) eine **Landdegradation in ariden, semiariden und trocken-subhumiden Gebieten infolge verschiedener Faktoren, darunter Klimaschwankungen und menschliche Tätigkeiten**. Es geht also nicht um wandernde Sanddünen, die eine Wüste vorrücken lassen, sondern um einen Verlust an Bodenfruchtbarkeit, Vegetation und Wasserspeicherung mitten im Kulturland, oft fleckenhaft rund um Brunnen und Dörfer. Desertifikation ist eine besonders schwere Form der **Degradation**.

Die Ursachen greifen ineinander (Abbildung 117):

- **Bevölkerungswachstum:** Die Bevölkerung der Sahelstaaten wächst sehr schnell (Niger hat eine der höchsten Geburtenraten der Welt). Mehr Menschen brauchen mehr Nahrung, mehr Brennholz und mehr Weide.
- **Ausweitung des Ackerbaus** nach Norden in Gebiete, die nur in feuchten Jahren Ernten bringen; Verkürzung oder Wegfall der Brache; Anbau von Erdnüssen und Baumwolle für den Export seit der Kolonialzeit.
- **Überweidung:** Brunnenbohrungen ermöglichten größere Herden und machten sie sesshafter; um die Brunnen wurde die Vegetation kahl gefressen und zertrampelt. Die Hirten werden von den Feldern in immer kleinere Weidegebiete abgedrängt.
- **Holzeinschlag:** Holz ist der wichtigste Brennstoff zum Kochen; um die Städte entstehen kahle Ringe.
- **Klimaschwankungen:** In Dürrejahren treffen diese Belastungen auf eine ohnehin geschwächte Vegetation.

Die Folgen verstärken sich selbst: Ohne Pflanzendecke heizt sich der Boden auf, Regentropfen verschlämmen die Oberfläche, es bildet sich eine Kruste. Das Wasser fließt oberflächlich ab, statt zu versickern, und nimmt Boden mit (Wassererosion); in der Trockenzeit trägt der Wind den Feinboden fort (Winderosion). Der Boden speichert weniger Wasser, die Vegetation wird noch spärlicher. Die hellere Oberfläche reflektiert mehr Strahlung (höhere Albedo), was nach einer viel diskutierten Hypothese den Niederschlag zusätzlich verringern kann.

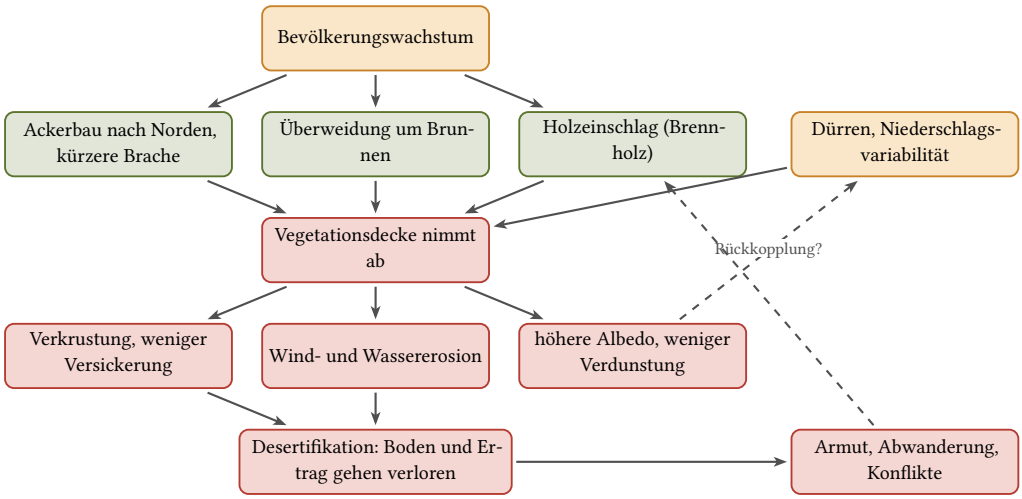


Abbildung 117: Wirkungsgefüge der Desertifikation im Sahel (vereinfacht). Gestrichelt: Rückkopplungen, die die Entwicklung verstärken können.

Typischer Fehler
Falsch: „Die Sahara wandert jedes Jahr um einige Kilometer nach Süden."
Richtig: Die Grenze der Wüste schwankt mit dem Niederschlag von Jahr zu Jahr vor und zurück. Desertifikation ist eine Verschlechterung der Böden und der Vegetation vor Ort, ausgelöst durch Übernutzung und Dürren.

7.4 Konzepte einer nachhaltigen Nutzung

Viele Großprojekte der Vergangenheit sind gescheitert: Tiefbrunnen ohne Weideregelung verschärften die Überweidung, Aufforstungen mit fremden Baumarten vertrockneten. Erfolgreicher sind einfache, von den Bauern selbst getragene Verfahren:

- **Zaï und Halbmonde** (Abbildung 118): In die verkrustete Oberfläche werden in der Trockenzeit kleine Pflanzgruben gehackt und mit Dung oder Kompost gefüllt. Sie fangen das Regenwasser, Termiten lockern den Boden, Hirse und Sorghum wachsen auf vorher kahlen Flächen. Die Technik wurde in Burkina Faso (Yatenga) wiederbelebt und verbreitet.
- **Steinwälle** (cordons pierreux) entlang der Höhenlinien bremsen den Abfluss; Wasser versickert, Feinboden und Samen bleiben liegen.
- **Von Bauern gesteuerte natürliche Regeneration** (FMNR, farmer managed natural regeneration): Statt Setzlinge zu pflanzen, schützen und beschneiden Bauern die Triebe, die aus noch lebenden Wurzelstöcken auf ihren Feldern wachsen. Bäume wie die Anabaum-Akazie (*Faidherbia albida*) binden Stickstoff, werfen in der Regenzeit ihr Laub ab (beschatten das Getreide also nicht) und liefern Futter, Brennholz und in der Trockenzeit Schatten. In Süd-Niger haben sich so nach Schätzungen auf etwa 5 Mio. ha rund 200 Mio. Bäume neu entwickelt (Reij, Tappan und Smale 2009); man spricht vom „Re-Greening". Eine wichtige Voraussetzung war, dass die Bauern das Recht bekamen, die Bäume auf ihren Feldern selbst zu nutzen.
- **Agroforstsysteme** und Gummiarabikum-Gärten (Verek-Akazie) verbinden Bodenschutz mit Einkommen.
- **Mobile Weidewirtschaft sichern:** Wanderkorridore für Herden, Weiderechte, Brunnen in größeren Abständen. Pastoralismus gilt heute als angepasste Nutzung, nicht als Ursache des Problems.
- **Energie:** Sparsame Kochherde und Solarkocher verringern den Brennholzbedarf.
- **Die Große Grüne Mauer** (Great Green Wall): Die Afrikanische Union startete 2007 die Initiative, einen Gürtel aus wiederhergestelltem Land quer durch Afrika zu schaffen. Bis 2030 sollen 100 Mio. ha degradiertes Land wiederhergestellt und 10 Mio. Arbeitsplätze geschaffen werden (UNCCD). Der Statusbericht von 2020 zeigte, dass erst ein kleiner Teil erreicht war; die Initiative setzt heute weniger auf eine Baumreihe als auf ein Mosaik lokaler Projekte. Finanzierung und politische Stabilität bleiben Probleme.

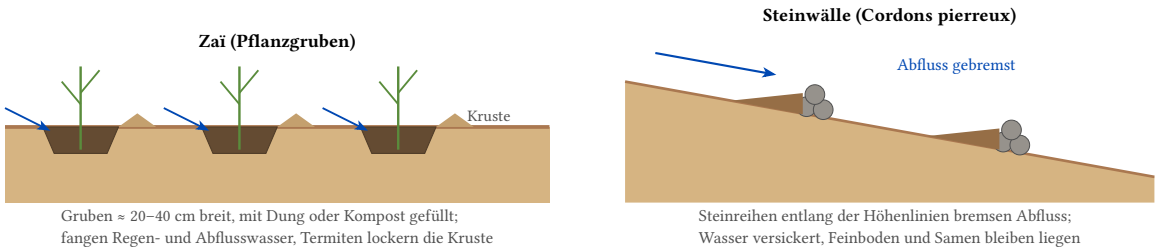


Abbildung 118: Zwei einfache Verfahren gegen Desertifikation (schematischer Querschnitt): Zaï-Pflanzgruben und Steinwälle entlang der Höhenlinien.

Nach dem Ende der Störung kann auch im Sahel **Sukzession** einsetzen: Werden Flächen eingezäunt oder die Weide geregelt, kehren Gräser, Kräuter und Gehölze aus der Samenbank des Bodens und aus Wurzelstöcken zurück. Je mehr Boden verloren ist, desto langsamer und unvollständiger verläuft sie.

Die Sahelzone zeigt, wie eng Ökologie, Wirtschaft und Politik verflochten sind: Armut, unsichere Landrechte, bewaffnete Konflikte und Migration (GL6, GL7) erschweren nachhaltige Nutzung; umgekehrt kann Bodenschutz Ernten sichern und Konflikte zwischen Hirten und Bauern entschärfen.

Fachbegriffe
Degradation: Verschlechterung von Boden, Vegetation und Wasserhaushalt eines Ökosystems durch Nutzung und Klimaschwankungen
Desertifikation: Landdegradation in ariden, semiariden und trocken-subhumiden Gebieten durch Klimaschwankungen und menschliche Tätigkeiten (UNCCD)
forstwirtschaftliche Nutzung: Nutzung von Bäumen und Gehölzen, im Sahel vor allem für Brennholz, Futterlaub und Gummiarabikum
Kulturpflanze: vom Menschen angebaute, gezüchtete Pflanze; im Sahel vor allem Perlhirse, Sorghum, Erdnuss, Bohnen
landwirtschaftliche Nutzung: im Sahel Regenfeldbau im Süden und mobile Weidewirtschaft (Nomadismus, Transhumanz) im Norden
Sukzession: natürliche Wiederbesiedlung und Abfolge der Vegetation, wenn die Übernutzung aufhört
Wildpflanze: nicht angebaute Pflanze, im Sahel etwa Akazien und Weidegräser, deren Nutzung (Futter, Holz) geregelt werden muss

Üben: **noctua** ↗

8 Boden als dynamisches Ökosystem

BP 3.5.2.5 (1)

Boden ist mehr als „Dreck“. Er ist die dünne, belebte Haut der Landoberfläche, in der sich Gestein, Wasser, Luft und Lebewesen durchdringen: das Grenzgebiet von Lithosphäre, Atmosphäre, Hydrosphäre und Biosphäre, die **Pedosphäre**. Er speichert und filtert Wasser, liefert Pflanzen Halt und Nährstoffe, baut Abfälle ab, speichert mehr Kohlenstoff als die Vegetation und die Atmosphäre zusammen und ist Lebensraum für unzählige Organismen.

8.1 Woraus Boden besteht

Ein günstiger Oberboden besteht etwa zur Hälfte aus fester Substanz und zur Hälfte aus Poren, die mit Wasser und Luft gefüllt sind (Abbildung 119). Die feste Substanz ist überwiegend mineralisch (Bruchstücke des Ausgangsgesteins, Tonminerale, Oxide), zu einem kleinen Teil organisch (**Humus**: abgestorbene, umgewandelte organische Substanz).

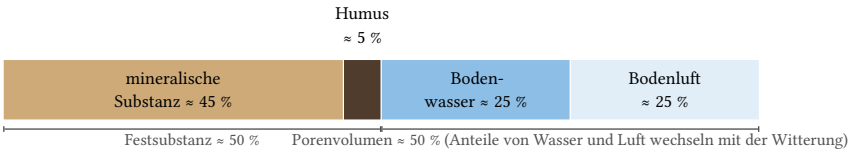


Abbildung 119: Zusammensetzung eines günstigen Oberbodens (Lehm) in Volumenprozent (Richtwerte). Die Anteile von Bodenwasser und Bodenluft wechseln mit der Witterung.

8.2 Korngröße und Bodenart

Die mineralischen Teilchen werden nach ihrem Durchmesser, der **Korngröße**, in Fraktionen eingeteilt (Abbildung 120). Teilchen über 2 mm bilden den Grobboden (Kies, Steine), Teilchen unter 2 mm die Feinerde aus **Sand** (0,063 bis 2 mm), **Schluff** (0,002 bis 0,063 mm) und **Ton** (unter 0,002 mm).

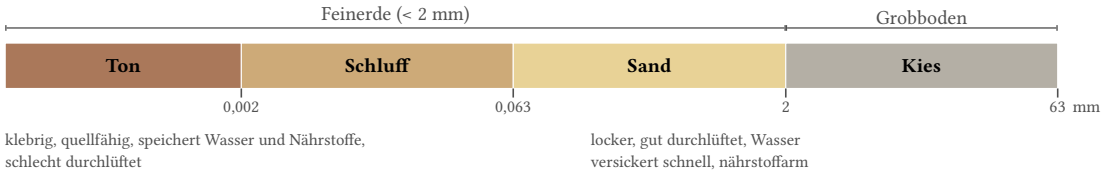


Abbildung 120: Korngrößenfraktionen nach der Bodenkundlichen Kartieranleitung (logarithmische Skala) und typische Eigenschaften der Extreme Ton und Sand.

Die **Bodenart** gibt an, in welchem Mischungsverhältnis Sand, Schluff und Ton in der Feinerde vorliegen. Hauptbodenarten sind **Sand**, **Schluff**, **Ton** und **Lehm**; Lehm ist ein Gemisch aller drei Fraktionen in ähnlichen Anteilen. Im Gelände bestimmt man die Bodenart mit der **Fingerprobe**: Sand ist körnig und rieselt, Schluff fühlt sich mehlig-samtig an (wie Löss), Ton ist klebrig, glänzt an der Schnittfläche und lässt sich zu dünnen Würsten ausrollen.

Die Bodenart bestimmt viele Eigenschaften:

- **Sandböden** haben viele große Poren: Wasser versickert schnell, sie sind gut durchlüftet und leicht zu bearbeiten, erwärmen sich im Frühjahr rasch, speichern aber wenig Wasser und Nährstoffe („leichte Böden“).
- **Tonböden** haben sehr viele, aber winzige Poren: Sie speichern viel Wasser und Nährstoffe, halten das Wasser aber so fest, dass Pflanzen einen Teil nicht nutzen können; sie sind schlecht durchlüftet, schwer zu bearbeiten, quellen bei Nässe und reißen bei Trockenheit („schwere Böden“).
- **Lehm- und Schluffböden** (Löss!) vereinen die Vorteile: genug Grob- und Mittelporen für Luft und pflanzenverfügbares Wasser, genug Ton für Nährstoffe. Sie gehören zu den besten Ackerböden.

8.3 Bodenwasser und Bodenluft

Das **Bodenwasser** füllt einen Teil der Poren. Wie fest es gehalten wird, hängt von der Porengröße ab:

- In **Grobporen** (über etwa 0,01 mm) kann die Kapillarkraft das Wasser nicht gegen die Schwerkraft halten: Es versickert in wenigen Tagen als Sickerwasser. Danach füllen sie sich mit Luft.
- In **Mittelporen** (0,0002 bis 0,01 mm) bleibt das Wasser als Haftwasser hängen, Pflanzenwurzeln können es aber noch heraussaugen: **pflanzenverfügbares Wasser**.

- In **Feinporen** (unter 0,0002 mm) wird das Wasser so stark gebunden, dass Pflanzen es nicht aufnehmen können: **Totwasser**.

Die Wassermenge, die ein Boden nach dem Ablaufen des Sickerwassers gegen die Schwerkraft halten kann, heißt **Feldkapazität**; der pflanzenverfügbare Teil davon heißt **nutzbare Feldkapazität**. Sie ist bei Schluff- und Lehmböden am höchsten, bei Sand am kleinsten; Ton speichert zwar am meisten Wasser, hat aber viel Totwasser.

Die **Bodenluft** füllt die übrigen Poren. Weil Wurzeln und Bodenorganismen atmen, enthält sie weniger Sauerstoff und ein Vielfaches an Kohlenstoffdioxid im Vergleich zur Atmosphäre. Wurzeln und die meisten Bodenlebewesen brauchen Sauerstoff; in staunassen oder verdichteten Böden fehlt er, Wurzeln sterben ab, und es laufen Reduktionsprozesse ab (Vergleyung, Kapitel 9).

8.4 Bodenlebewesen

Die Gesamtheit der **Bodenlebewesen** heißt **Edaphon**. In einer Handvoll fruchtbarem Boden leben mehr Organismen als Menschen auf der Erde: Bakterien und Pilze (der Masse nach die Hauptgruppen), Algen, Einzeller, Fadenwürmer, Milben, Springschwänze, Asseln, Tausendfüßer, Insektenlarven und **Regenwürmer**, unter Grünland oft mehrere Hundert je Quadratmeter. Sie

- **zerkleinern** die Streu und machen sie für Mikroorganismen angreifbar,
- **zersetzen** organische Substanz chemisch (Mineralisierung, Humifizierung, siehe unten),
- **durchmischen** den Boden (**Bioturbation**): Regenwürmer fressen Erde und Streu und bringen sie als Losung wieder aus, in der Ton und Humus innig verbunden sind; ihre Gänge belüften und entwässern den Boden,
- bauen ein stabiles **Krümelgefüge** auf, das Erosion und Verschlämmung widersteht.

8.5 Verwitterung, Tonminerale und Mineralsalze

Am Anfang jeder Bodenbildung steht die **Verwitterung** des Ausgangsgesteins (physikalisch, chemisch, biogen; ausführlich in GL2). Bei der chemischen Verwitterung werden Minerale wie Feldspäte und Glimmer zerlegt. Dabei entstehen zwei für den Boden entscheidende Produkte:

- **Mineralsalz**e: Die bei der Verwitterung (und beim Abbau organischer Substanz) frei werdenden Ionen wie Kalium (K^+), Calcium (Ca^{2+}), Magnesium (Mg^{2+}), Ammonium (NH_4^+), Nitrat (NO_3^-), Phosphat und Sulfat. Pflanzen nehmen ihre Nährstoffe in dieser gelösten Form auf.
- **Tonmineral**e: winzige, plättchenförmige Schichtsilikate, die bei der Verwitterung umgebildet oder neu gebildet werden (Abbildung 121). **Zweischicht-Tonminerale** wie Kaolinit bestehen aus fest verbundenen Paketen aus je einer Tetraeder- und einer Oktaederschicht; sie entstehen bei sehr intensiver Verwitterung (Tropen). **Dreischicht-Tonminerale** wie Illit und Smektit haben zwischen ihren Paketen Raum für Kationen (Illit vor allem fest eingebautes Kalium), Smektit auch für Wasser (quellfähig); sie entstehen bei gemäßigter Verwitterung (Mitteleuropa, Steppen).

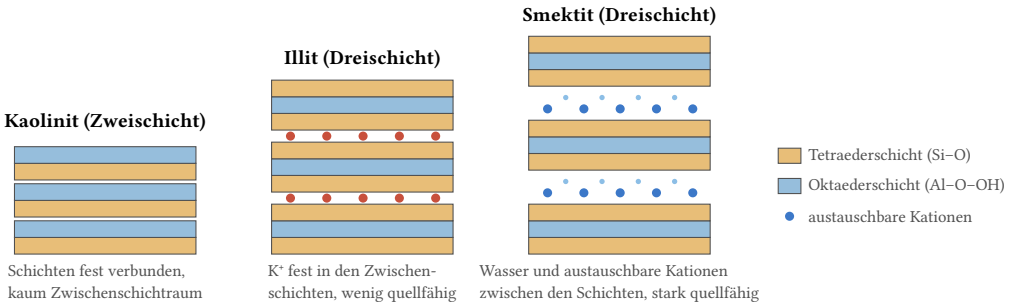


Abbildung 121: Aufbau von Tonmineralen (schematisch): Zweischicht-Tonmineral Kaolinit, Dreischicht-Tonminerale Illit und Smektit.

Tonminerale und Humus tragen an ihrer Oberfläche **negative Ladungen**. Dort lagern sich Kationen an und werden so vor der Auswaschung geschützt, bleiben aber gegen andere Kationen austauschbar. Diese Eigenschaft heißt Kationenaustausch; sie macht Ton und Humus zum Nährstoffspeicher des Bodens (Kapitel 10).

8.6 Abbau der Streu: Mineralisierung und Humifizierung

Abgestorbene Pflanzenteile (Streu), Wurzeln und tote Tiere werden von den Bodenlebewesen in zwei Richtungen umgesetzt:

- **Mineralisierung**: der vollständige Abbau organischer Substanz zu anorganischen Stoffen, also zu Kohlenstoffdioxid, Wasser und Mineralsalzen. Sie macht die in der Biomasse gebundenen Nährstoffe wieder pflanzenverfügbar. Sie läuft schnell, wenn es warm und feucht ist und viele Organismen aktiv sind (Tropen, Mull im Laubwald), und langsam, wenn es kalt, nass oder sauer ist.
- **Humifizierung**: der Umbau eines Teils der Streu zu dunklen, hochmolekularen, schwer abbaubaren **Huminstoffen**. Humus speichert Wasser und Nährstoffe, färbt den Oberboden dunkel, verbessert das Gefüge und wird über Jahrzehnte bis Jahrhunderte nur langsam abgebaut.

Je nach Bedingungen entstehen verschiedene **Humusformen**: **Mull** (Streu rasch eingearbeitet, krümeliger, gut durchmischter Oberboden; unter Laubwald und Grasland auf basenreichen Böden), **Moder** (Zwischenform) und **Rohhumus** (dicke, saure Auflage kaum zersetzter Nadeln und Zwergstrauchreste; im borealen Nadelwald und unter Heide).

8.7 Mineralsalzkreislauf und Nährstoffhaushalt

Die Nährstoffe zirkulieren in einem Kreislauf zwischen Pflanze und Boden, dem **Mineralsalzkreislauf** (Abbildung 122): Pflanzen nehmen Mineralsalze aus der Bodenlösung auf und bauen sie in ihre Biomasse ein; mit der Streu gelangen sie zurück auf den Boden; Bodenlebewesen mineralisieren sie, und sie stehen erneut zur Verfügung. Ein Teil wird in Humus gebunden oder an Ton-Humus-Komplexen gespeichert.

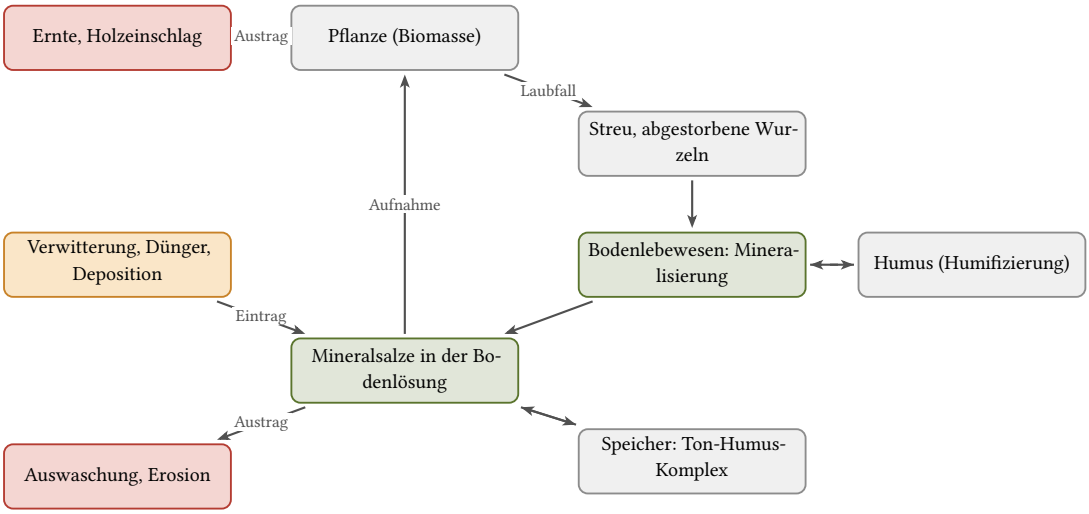


Abbildung 122: Mineralsalzkreislauf (vereinfacht): Einträge, Kreislauf zwischen Pflanze und Boden, Speicher und Austräge.

Der **Nährstoffhaushalt** eines Bodens ist die Bilanz aus Einträgen (Verwitterung, Eintrag aus der Luft, Stickstoffbindung durch Bakterien, Düngung), Speicherung (Humus, Ton-Humus-Komplex, Biomasse) und Austrägen (Auswaschung mit dem Sickerwasser, Erosion, Ernte). In einem natürlichen Ökosystem ist der Kreislauf weitgehend geschlossen. Landwirtschaft öffnet ihn: Mit jeder Ernte werden Nährstoffe vom Feld abgefahren und müssen ersetzt werden; zu viel Dünger wird ausgewaschen und belastet Grundwasser und Gewässer.

8.8 Boden als dynamisches Ökosystem

Boden ist kein fertiger Zustand, sondern ein System in ständiger Veränderung. Im Tageslauf schwanken Temperatur, Wasser- und Luftgehalt, im Jahreslauf die Aktivität der Bodenlebewesen und die Nährstoffvorräte. Über Jahrhunderte und Jahrtausende laufen die **bodenbildenden Prozesse** ab: Verwitterung und Tonmineralbildung, Humusbildung, Gefügebildung durch Bodenlebewesen, Entkalkung und Versauerung, Verlagerung von Stoffen mit dem Sickerwasser nach unten und mit dem Grundwasser nach oben. So entstehen Lagen unterschiedlicher Farbe und Eigenschaften, die Bodenhorizonte (Kapitel 9). Bodenbildung ist langsam: Für einen Zentimeter Boden braucht es je nach Klima und Gestein etwa hundert bis mehrere hundert Jahre. Erosion kann denselben Zentimeter in einem einzigen Starkregen abtragen. Boden ist deshalb in menschlichen Zeiträumen eine **nicht erneuerbare Ressource**.

Merksatz

Boden besteht aus mineralischer und organischer Substanz, Wasser, Luft und Lebewesen. Bodenart und Korngröße bestimmen Wasser-, Luft- und Nährstoffhaushalt. Bodenlebewesen mineralisieren die Streu (Nährstoffe werden frei) und humifizieren einen Teil (Humus entsteht). Tonminerale und Humus speichern Nährstoffe; im Mineralsalzkreislauf zirkulieren sie zwischen Pflanze und Boden.

Fachbegriffe

Bodenart: Mischungsverhältnis von Sand, Schluff und Ton in der Feinerde (Sand, Schluff, Lehm, Ton)
Bodenlebewesen: Gesamtheit der Organismen im Boden (Edaphon), die Streu zerkleinern, zersetzen und den Boden durchmischen
Bodenluft: Luft in den Poren des Bodens; ärmer an Sauerstoff, reicher an Kohlenstoffdioxid als die Atmosphäre
Bodenwasser: Wasser in den Bodenporen: Sickerwasser in Grob-, pflanzenverfügbares Haftwasser in Mittel-, Totwasser in Feinporen
Humifizierung: Umbau organischer Substanz zu dunklen, schwer abbaubaren Huminstoffen (Humus)
Korngröße: Durchmesser der mineralischen Bodenteilchen; Fraktionen Ton, Schluff, Sand, Kies
Mineralisierung: vollständiger Abbau organischer Substanz zu Kohlenstoffdioxid, Wasser und Mineralsalzen
Mineralsalz: gelöste Ionen (z. B. K^+, Ca^{2+}, NO_3^-), in denen Pflanzen Nährstoffe aufnehmen
Mineralsalzkreislauf: Kreislauf der Nährstoffe von der Bodenlösung über die Pflanze und die Streu zurück in den Boden
Nährstoffhaushalt: Bilanz aus Eintrag, Speicherung und Austrag von Pflanzennährstoffen in einem Boden
Tonmineral: plättchenförmiges Schichtsilikat unter 0,002 mm (Zwei- oder Dreischicht), speichert Wasser und Kationen

Üben: **noctua** ↗

9 Bodenbildung und Bodentypen

BP 3.5.2.5 (2)

Gräbt man eine Grube und sticht eine Wand senkrecht ab, sieht man keinen einheitlichen Boden, sondern Lagen unterschiedlicher Farbe, Körnung und Festigkeit. Sie erzählen die Geschichte des Bodens.

9.1 Bodenhorizont, Bodenprofil, Bodentyp

Ein **Bodenhorizont** ist eine annähernd parallel zur Oberfläche liegende Lage im Boden, die durch bodenbildende Prozesse entstanden ist und sich in Farbe, Körnung, Gefüge oder Humusgehalt von den Lagen darüber und darunter unterscheidet. Der senkrechte Schnitt durch alle Horizonte bis zum Ausgangsgestein heißt **Bodenprofil**. Böden mit gleicher Abfolge von Horizonten, also mit gleicher Entwicklung, fasst man zu einem **Bodentyp** zusammen.

Zeichen	Bedeutung (Auswahl, nach der Bodenkundlichen Kartieranleitung)
O	organische Auflage aus Streu und Rohhumus über dem Mineralboden
A	mineralischer Oberboden: **Ah** humos, **Ap** gepflügt, **Ae** gebleicht (Podsol), **Al** an Ton verarmt (lessiviert), **Ax** durch Bodentiere humos und tiefgründig durchmischt (Schwarzerde)
B	Unterboden: **Bv** verbraunt und verlehmt, **Bt** mit Ton angereichert, **Bh** mit Humus angereichert, **Bs** mit Eisen- und Aluminiumoxiden angereichert
C	Ausgangsgestein: **Cv** angewittert, **Cn** unverwittert; vorangestellt **c** kalkhaltig, **el** Löss
G	vom Grundwasser geprägt: **Go** Oxidationshorizont mit Rostflecken, **Gr** Reduktionshorizont, grau bis blaugrün

Tabelle 17: Horizontbezeichnungen. Großbuchstaben stehen für die Lage im Profil, nachgestellte Kleinbuchstaben für Merkmale.

9.2 Die Bodenbildungsfaktoren

Welcher Bodentyp entsteht, hängt von den **Bodenbildungsfaktor**en ab (Abbildung 123):

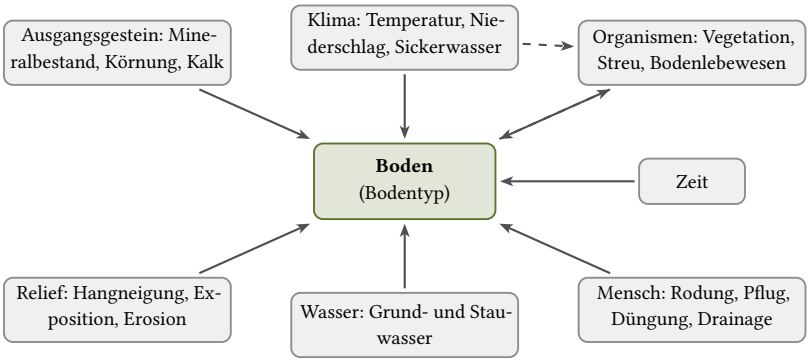


Abbildung 123: Bodenbildungsfaktoren. Sie wirken zusammen und beeinflussen sich gegenseitig, etwa das Klima die Vegetation und der Boden wiederum die Vegetation (gestrichelt).

- **Ausgangsgestein:** Es liefert die Minerale, bestimmt Körnung und Kalkgehalt. Auf Kalkstein entstehen andere Böden als auf Granit oder Sand.
- **Klima:** Temperatur steuert die Geschwindigkeit der Verwitterung und des Streuabbaus, der Niederschlag die Menge des Sickerwassers und damit die Verlagerung. In humiden Klimaten werden Stoffe nach unten ausgewaschen, in ariden steigen gelöste Salze mit dem verdunstenden Wasser auf.
- **Organismen:** Die Vegetation bestimmt Menge und Art der Streu (gut zersetzbares Laub oder saure Nadeln), die Bodenlebewesen Zersetzung und Durchmischung.
- **Relief:** An Hängen wird Boden abgetragen, in Mulden angehäuft; Exposition verändert das Mikroklima.
- **Wasser:** Hoch anstehendes Grundwasser oder gestautes Niederschlagswasser verhindern die Durchlüftung.
- **Mensch:** Rodung, Pflügen, Düngung, Kalkung, Entwässerung, Bewässerung, Versiegelung.
- **Zeit:** Viele Böden Mitteleuropas haben sich erst seit dem Ende der letzten Kaltzeit vor etwa 11700 Jahren entwickelt; tropische Böden sind oft Hunderttausende bis Millionen Jahre alt.

9.3 Die bodenbildenden Prozesse des Plans

Verbraunung und Verlehmung. Bei der chemischen Verwitterung eisenhaltiger Silikate (Glimmer, Feldspäte mit Eisen, Augit) wird Eisen frei und zu Eisenoxiden wie Goethit oxidiert. Diese überziehen die Bodenteilchen und färben den Boden braun. Gleichzeitig bilden sich neue Tonminerale (**Verlehmung**). Es entsteht ein brauner, lehmiger Bv-Horizont. Voraussetzung sind ein feucht-gemäßigtes Klima und ein entkalkter Boden.

Lessivierung (Tonverlagerung). Ist ein Boden entkalkt und mäßig sauer (pH etwa 5 bis 6,5), können sich feinste Tonteilchen aus dem Verband lösen und werden mit dem Sickerwasser durch Grobporen nach unten getragen. Oben verarmt der Boden an Ton und wird heller (Al-Horizont), weiter unten wird der Ton abgelagert, oft als glänzende Häutchen auf den Aggregaten (Bt-Horizont). Der Bt-Horizont ist dichter und kann Wasser stauen.

Podsolierung. In sehr sauren Böden (pH unter etwa 4 bis 4,5) unter Rohhumus entstehen bei der Zersetzung der Nadel- und Heidestreu organische Säuren. Sie bilden mit Eisen und Aluminium lösliche Verbindungen, die mit dem Sickerwasser nach unten wandern. Zurück bleibt ein ausgebleichter, aschgrauer Horizont aus fast reinem Quarz (Ae; russisch „Podsol“ heißt Ascheboden). Weiter unten fallen Humus (Bh) und Eisen- und Aluminiumoxide (Bs) wieder aus, teils zu einer harten Schicht verkittet (**Ortstein**), die Wurzeln und Wasser kaum durchdringen.

Vergleyung. Im Bereich des Grundwassers fehlt der Sauerstoff. Im ständig nassen Bereich wird Eisen zu löslichem Fe^{2+} reduziert, der Boden wird grau bis blaugrün (Reduktionshorizont Gr). Im Schwankungsbereich des Grundwassers dringt zeitweise Luft ein; das gelöste Eisen wird oxidiert und fällt als rostbraune Flecken und Röhren um Wurzelgänge aus (Oxidationshorizont Go).

Ferralitisierung. In den feuchten Tropen verwittert das Gestein bei hohen Temperaturen und viel Sickerwasser über sehr lange Zeit tiefgründig, oft zehn Meter und mehr. Dabei werden die Silikate fast vollständig zerlegt; Kieselsäure und die basischen Kationen (Calcium, Magnesium, Kalium, Natrium) werden ausgewaschen (**Desilifizierung**). Zurück bleiben schwer lösliche Eisen- und Aluminiumoxide (rote und gelbe Farbe) und das Zweischicht-Tonmineral Kaolinit. Es entsteht ein tiefer, roter bis gelber, nährstoffarmer Unterboden.

Zur Schwarzerde gehört ein weiterer Prozess, die **Humusakkumulation**: Unter Steppengras wird viel organische Substanz gebildet, aber im kalten Winter und trockenen Sommer nur langsam abgebaut; grabende Tiere (Ziesel, Hamster, Regenwürmer) mischen sie tief in den Boden ein.

9.4 Sieben Bodentypen

> Der Bildungsplan verlangt drei Bodentypen aus der Liste; hier stehen alle sieben. Die Profile sind schematisch, die Tiefen typische Werte.

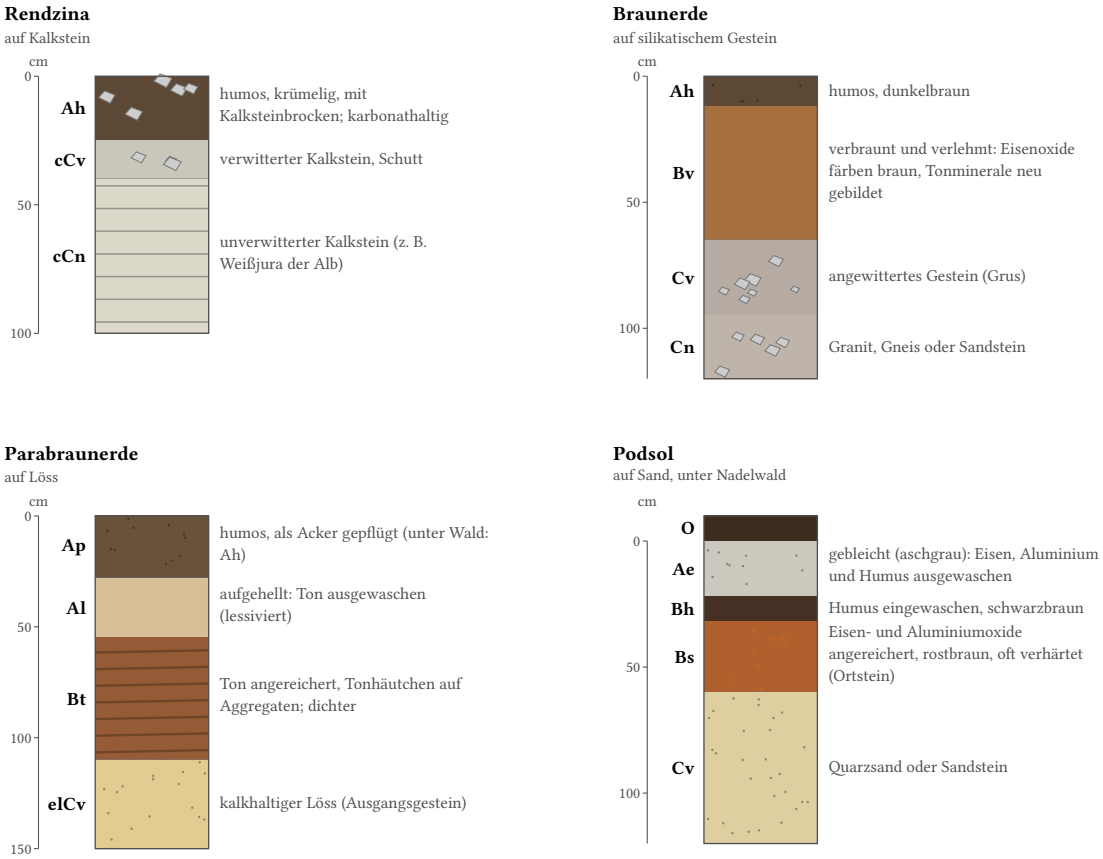


Abbildung 124: Schematische Bodenprofile (I): Rendzina, Braunerde, Parabraunerde und Podsol. Tiefen in cm.

Rendzina (Ah – C). Ein junger, flachgründiger Boden auf Kalkstein, Dolomit oder Gips. Der Kalk wird gelöst und weggeführt, der unlösliche Rest ist gering; so bildet sich nur ein humusreicher, krümeliger Ah-Horizont voller Kalksteinbrocken direkt über dem Gestein. Die Bodenlebewesen sind sehr aktiv (Mull). Verbreitung: Kalkgebirge wie die Schwäbische und Fränkische Alb, der Jura, die Kalkalpen; auf Hochflächen und an Hängen.

Braunerde (Ah – Bv – C). Der häufigste Bodentyp Mitteleuropas. Unter einem humosen Oberboden liegt ein durch Verbraunung und Verlehmung brauner Bv-Horizont. Sie entsteht auf vielen silikatischen Gesteinen (Granit, Gneis, Sandstein, Schiefer), aber auch auf entkalktem Löss, im feucht-gemäßigten Klima unter Laub- und Mischwald. Verbreitung in Baden-Württemberg: Schwarzwald, Odenwald, Keuperbergland.

Parabraunerde (Ah – Al – Bt – C). Sie entwickelt sich vor allem aus kalkhaltigem Löss: Zuerst wird der Kalk ausgewaschen (Entkalkung), dann verbraunt der Boden, schließlich setzt Lessivierung ein. Typisch sind der hellere, tonarme Al-Horizont und der dichte, tonreiche Bt-Horizont. Verbreitung: Lössgebiete im Klima des sommergrünen Laubwalds, etwa der Kraichgau, die Gäulandschaften, die Oberrheinebene am Rand des Schwarzwalds, die Börden am Nordrand der Mittelgebirge.

Podsol (O – Ae – Bh – Bs – C). Er entsteht durch Podsolierung auf basenarmem, durchlässigem Gestein (Quarzsand, Buntsandstein, Granit) unter Nadelwald oder Heide bei hohem Niederschlag und kühlem Klima. Unter einer dicken Rohhumusauflage folgt der aschgraue Ae-Horizont, darunter der schwarzbraune Bh- und der rostbraune Bs-Horizont. Verbreitung: Zonaler Boden des borealen Nadelwalds; in Mitteleuropa im Norddeutschen Tiefland (Lüneburger Heide) und im Nordschwarzwald auf Buntsandstein.

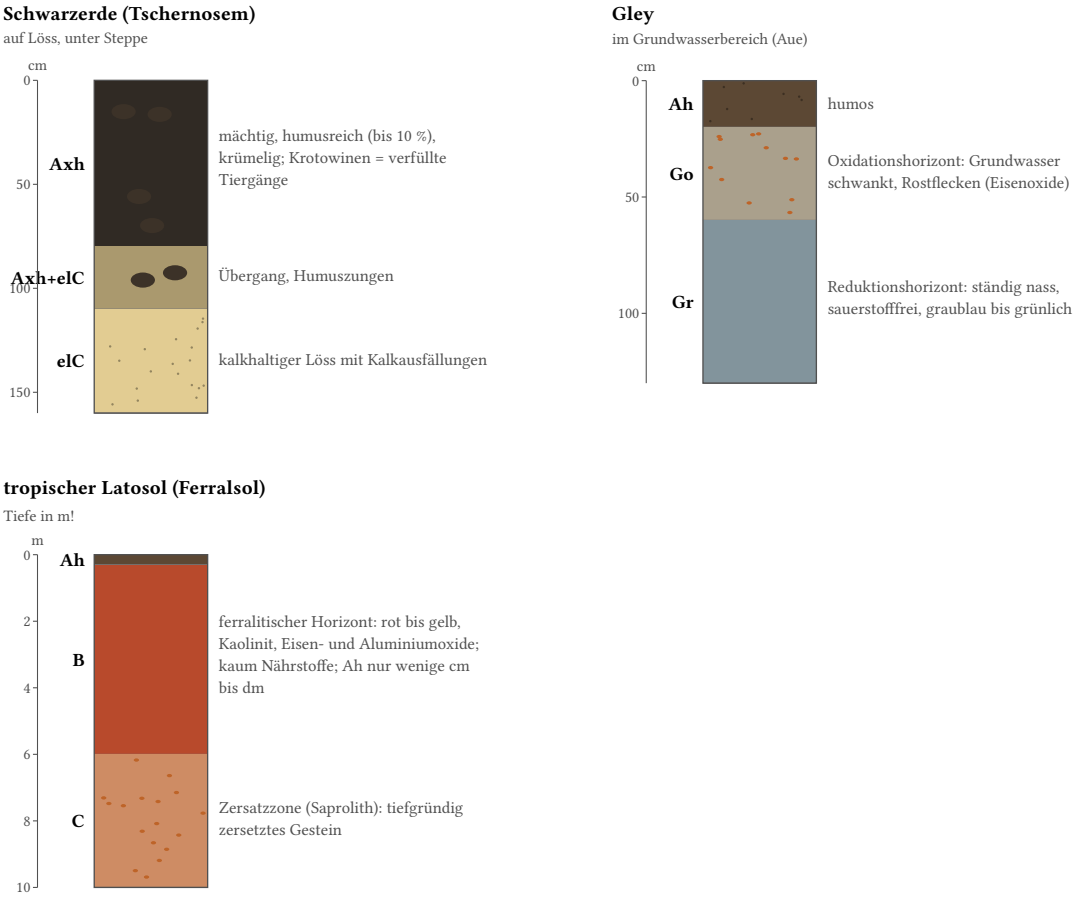


Abbildung 125: Schematische Bodenprofile (II): Schwarzerde, Gley (Tiefen in cm) und tropischer Latosol (Tiefen in m, anderer Maßstab).

Schwarzerde (Tschernosem; Axh – C). Ein bis über einen Meter mächtiger, schwarzer, humusreicher A-Horizont direkt über kalkhaltigem Löss. Er entsteht durch Humusakkumulation und intensive Durchmischung durch grabende Tiere; verfüllte Tiergänge sind als dunkle oder helle Flecken sichtbar (**Krotowinen**). Weil im Steppenklima wenig Sickerwasser fällt, bleibt der Boden basenreich und kaum verlagert. Verbreitung: Steppengürtel von der Ukraine über Südrussland bis Kasachstan, Prärie Nordamerikas, Pampa; in Deutschland als Relikt der trockeneren Nacheiszeit in der Magdeburger und Hildesheimer Börde und in Rheinhessen.

Gley (Ah – Go – Gr). Ein Grundwasserboden: Das Grundwasser steht hoch, meist weniger als einen Meter unter der Oberfläche. Durch Vergleyung bilden sich der rostfleckige Go- und der graublaue Gr-Horizont. Verbreitung: azonal in Flussauen, Niederungen und Senken mit hohem Grundwasserspiegel, etwa in der Rheinaue, im Donauried und in vielen Bachtälern.

tropischer Latosol (in der internationalen Klassifikation Ferralsol). Er entsteht durch Ferralitisierung unter tropischem Regenwald und Feuchtsavanne auf alten Landoberflächen: ein viele Meter tiefer, roter bis gelber, gleichförmiger Boden aus Kaolinit und Eisen- und Aluminiumoxiden, über einer mächtigen Zersatzzone. Der humose Oberboden ist nur wenige Zentimeter bis Dezimeter dick. Verbreitung: Amazonien, Kongobecken, Ostbrasilien, Teile Südostasiens.

9.5 Räumliche Verbreitung

Die Verbreitung der Bodentypen zeigt dieselbe Ordnung wie die der Ökosysteme, weil Klima und Vegetation zu den wichtigsten Bodenbildungsfaktoren gehören:

- **Zonale Böden** folgen den Klima- und Vegetationszonen: Podsol im borealen Nadelwald, Braunerde und Parabraunerde im sommergrünen Laub- und Mischwald, Schwarzerde in der Steppe, Latosol im tropischen Regenwald.
- **Intrazonale und azonale Böden** werden von einem örtlichen Faktor bestimmt, der den Einfluss des Klimas überdeckt: Rendzina vom Kalkgestein, Gley vom Grundwasser.

Auf engem Raum verändert vor allem das Relief die Böden. An einem Hang folgen gesetzmäßig verschiedene Bodentypen aufeinander; eine solche Abfolge heißt **Catena** (Abbildung 126).

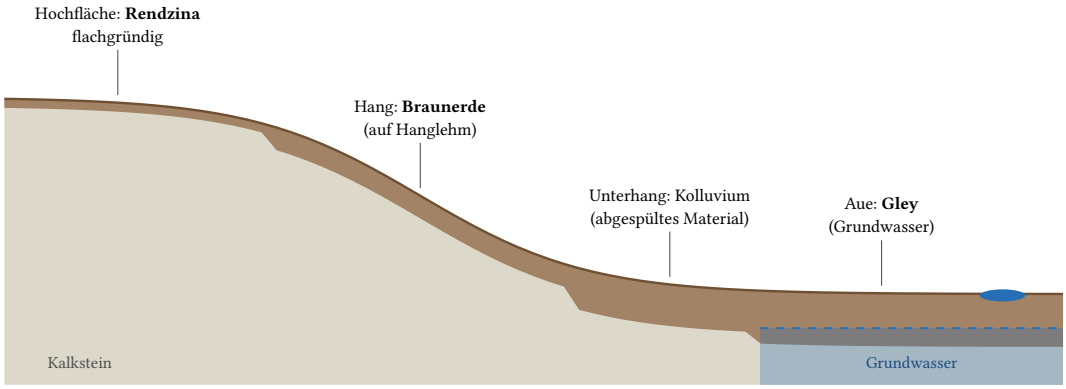


Abbildung 126: Catena an einem Hang der Schwäbischen Alb (schematisch): flachgründige Rendzina auf der Hochfläche, Braunerde am Hang, abgespültes Bodenmaterial (Kolluvium) am Unterhang, Gley in der Aue.

Fachbegriffe
Bodenbildungsfaktor: Einflussgröße der Bodenbildung: Ausgangsgestein, Klima, Organismen, Relief, Wasser, Mensch, Zeit
Bodenhorizont: durch Bodenbildung entstandene, etwa oberflächenparallele Lage mit eigenen Merkmalen (z. B. Ah, Bv, Bt, C)
Bodenprofil: senkrechter Schnitt durch alle Horizonte eines Bodens bis zum Ausgangsgestein
Bodentyp: Gruppe von Böden mit gleicher Horizontabfolge und Entwicklung: Braunerde, Parabraunerde, Schwarzerde, Rendzina, Podsol, Gley, tropischer Latosol
Ferralitisierung: tiefgründige tropische Verwitterung mit Auswaschung von Kieselsäure und Basen und Anreicherung von Eisen- und Aluminiumoxiden
Lessivierung: Verlagerung von Ton mit dem Sickerwasser vom Al- in den Bt-Horizont
Podsolierung: Verlagerung von Humus, Eisen und Aluminium mit organischen Säuren aus dem gebleichten Ae- in den Bh- und Bs-Horizont
Verbraunung: Braunfärbung durch Eisenoxide aus der Verwitterung eisenhaltiger Silikate, meist mit Tonneubildung (Verlehmung)
Vergleyung: Reduktion (Gr) und Oxidation (Go, Rostflecken) von Eisen im Bereich des Grundwassers

Üben: **noctua** ↗

10 Bodenfruchtbarkeit und nachhaltige Nutzung

BP 3.5.2.5 (3)

Warum bringt ein Acker in der Magdeburger Börde Spitzenerträge ohne viel Dünger, während ein gerodeter Regenwaldboden nach drei Jahren kaum noch etwas trägt, obwohl darauf zuvor der üppigste Wald der Erde wuchs? Die Antwort liegt in den Bodeneigenschaften.

10.1 Bodenfruchtbarkeit

Die **Bodenfruchtbarkeit** ist die Fähigkeit eines Bodens, Pflanzen als Standort zu dienen und dauerhaft Erträge zu ermöglichen. Sie ergibt sich aus dem Zusammenspiel mehrerer Eigenschaften:

- **Nährstoffhaushalt:** Vorrat an Nährstoffen und die Fähigkeit, sie zu speichern und abzugeben;
- **Wasserhaushalt** des Bodens: Menge an pflanzenverfügbarem Wasser (nutzbare Feldkapazität), Versickerung, keine Staunässe;
- **Luft- und Wärmehaushalt:** genug Grobporen, rasche Erwärmung;
- **Gründigkeit:** wie tief Wurzeln eindringen können;
- **Bodenreaktion:** der pH-Wert (die meisten Kulturpflanzen bevorzugen etwa 6 bis 7);
- **Gefüge und Bodenleben:** krümelige, stabile Struktur, aktive Bodenlebewesen, ausreichend Humus.

In Deutschland wird die Ertragsfähigkeit landwirtschaftlicher Böden in der amtlichen **Bodenschätzung** mit der **Bodenzahl** bzw. **Ackerzahl** von 1 bis etwa 100 angegeben. Den Bezugswert 100 hat eine Schwarzerde bei Eickendorf in der Magdeburger Börde.

10.2 Kationenaustauschkapazität und Ton-Humus-Komplex

Die Nährstoffe Kalium, Calcium, Magnesium und Ammonium liegen im Boden als positiv geladene Ionen (Kationen) vor. In der Bodenlösung würden sie mit dem Sickerwasser schnell ausgewaschen. Festgehalten werden sie an den negativ geladenen Oberflächen von Tonmineralen und Huminstoffen. Weil Ton und Humus sich im Boden zu stabilen Krümeln verbinden, oft im Darm der Regenwürmer, spricht man vom **Ton-Humus-Komplex** (Abbildung 127).

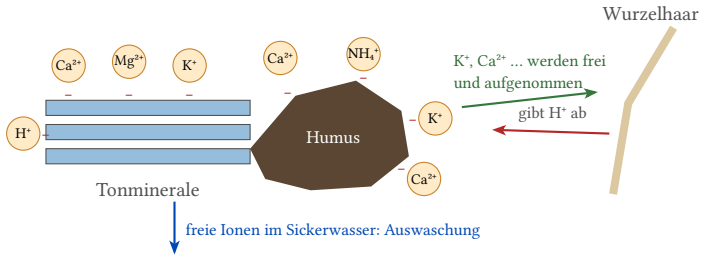


Abbildung 127: Ton-Humus-Komplex und Kationenaustausch (schematisch): Kationen sind an den negativ geladenen Oberflächen von Tonmineralen und Humus gebunden. Die Wurzel gibt H^+-Ionen ab und tauscht dafür Nährstoff-Kationen ein.

Die gebundenen Kationen sind **austauschbar**: Wurzeln geben Wasserstoffionen (H^+) ab, die an die Austauscherplätze gehen und dafür Nährstoff-Kationen freisetzen, die die Pflanze aufnimmt. Die Menge an Kationen, die ein Boden auf diese Weise austauschbar binden kann, heißt **Kationenaustauschkapazität** (KAK). Man gibt sie in Zentimol Ladung je Kilogramm Boden an ($cmol_c$ pro kg). Sie hängt vom Gehalt und von der Art der Tonminerale und vom Humusgehalt ab (Abbildung 128): Huminstoffe und Dreischicht-Tonminerale wie Smektit haben eine hohe KAK, das Zweischicht-Tonmineral Kaolinit eine sehr geringe.

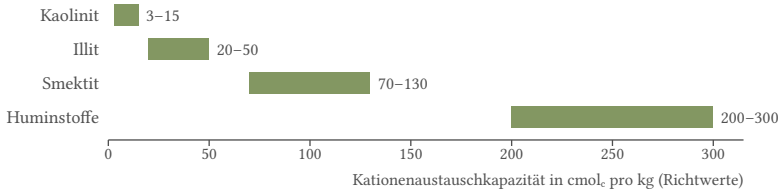


Abbildung 128: Kationenaustauschkapazität von Tonmineralen und Huminstoffen (Spannen typischer Werte, gerundet; bei Huminstoffen stark vom pH-Wert abhängig). Daten: Lehrbuchwerte nach Scheffer und Schachtschabel.

Wichtig ist auch, **welche** Kationen die Plätze belegen. Der Anteil der Nährstoff-Kationen (Ca, Mg, K, Na) an der KAK heißt **Basensättigung**. In sauren Böden besetzen H^+- und Aluminiumionen die Plätze; dann ist die Basensättigung niedrig, Nährstoffe fehlen, und Aluminium kann für Wurzeln giftig werden.

Merksatz

Ein Boden ist fruchtbar, wenn er Nährstoffe speichern und abgeben kann (hohe KAK durch Humus und Dreischicht-Tonminerale, hohe Basensättigung), viel pflanzenverfügbares Wasser hält, gut durchlüftet und tiefgründig ist und ein aktives Bodenleben hat. Die KAK ist kein Nährstoffvorrat an sich, sondern die Größe des Speichers.

10.3 Die Bodentypen im Vergleich

Bodentyp	Eigenschaften	Nutzung	Gefährdung
Schwarzerde	mächtiger Humushorizont, hohe KAK, hohe Basensättigung, sehr gute Wasserspeicherung, krümelig	beste Ackerböden: Weizen, Mais, Zuckerrüben, Sonnenblumen	Wind- und Wassererosion, Humusschwund bei Daueracker, Verdichtung, Trockenheit
Parabraunerde	tiefgründig, gute Wasserspeicherung (Löss), mittlere bis hohe KAK; Bt etwas dicht	ertragreiches Ackerland, Sonderkulturen	Wassererosion auf geneigten Feldern, Verdichtung, Verschlämmung
Braunerde	je nach Gestein nährstoffarm (Granit, Sandstein) bis nährstoffreich (Basalt); mäßig sauer bis neutral	Wald, Grünland; Acker auf den besseren Standorten	Versauerung, Erosion an Hängen
Rendzina	flachgründig, steinig, kalkreich, krümelig; wenig Wasser	Wald (Buchen), Schafweide, Wacholderheiden, Trockenrasen	Austrocknung, Erosion bei Rodung; Acker kaum lohnend
Podsol	sehr sauer, nährstoffarm, geringe KAK, wenig Wasser; teils Ortstein	Nadelwald, Heide; Acker nur mit Kalkung und Düngung	weitere Versauerung, Auswaschung, Winderosion auf Sand
Gley	nass, schlecht durchlüftet, oft nährstoffreich (Auenlehm)	Grünland, Auwald; nach Entwässerung Acker	Entwässerung zerstört Feuchtgebiete, Humusabbau; Hochwasser
tropischer Latosol	tief verwittert, Kaolinit und Oxide, sehr geringe KAK, sauer, kaum Nährstoffreserven; gute Durchlässigkeit	Regenwald; Wanderfeldbau, Weide, Soja, Ölpalmen mit viel Dünger	Nährstoffverlust nach Rodung, Erosion, Verhärtung der Oxide (Laterit)

Tabelle 18: Eigenschaften, Nutzung und Gefährdung der sieben Bodentypen (vereinfacht).

10.4 Drei Bodentypen unter dem Aspekt der Nachhaltigkeit

Schwarzerde: fruchtbar, aber verletzlich. Die Schwarzerden der Ukraine, Südrusslands, der Prärie und der Pampa gehören zu den Kornkammern der Welt. Ihre Fruchtbarkeit verdanken sie dem humusreichen Oberboden mit hoher KAK und guter Wasserspeicherung. Gerade diese Gunst verführt zur Übernutzung: Wird der Boden jahrzehntelang ohne Zwischenfrüchte und organische Düngung beackert, sinkt der Humusgehalt; der Boden wird im trockenen Steppenklima schutzlos gegen den Wind. In den 1930er Jahren wehten in den Great Plains der USA nach Dürrejahren auf umgebrochener Prärie riesige Staubstürme den Oberboden fort („Dust Bowl“). Nachhaltig sind Windschutzhecken, Mulch- und Direktsaat (der Boden bleibt bedeckt), vielfältige Fruchtfolgen mit Zwischenfrüchten und die Rückführung organischer Substanz.

Parabraunerde: das Rückgrat des deutschen Ackerbaus. Auf Löss entstandene Parabraunerden wie im Kraichgau sind tiefgründig und speichern viel Wasser. Ihre Schwäche ist die **Wassererosion**: Der schluffige Löss verschlämmt bei Starkregen, auf geneigten, im Frühsommer noch kahlen Mais- und Rübenfeldern fließt Wasser ab und reißt Rillen und Rinnen. Schwere Maschinen verdichten den Unterboden. Nachhaltig sind Bodenbedeckung (Mulchsaat,

Zwischenfrüchte), Bearbeitung quer zum Hang, Grünstreifen in Abflussbahnen, kleinere Schläge, leichtere Maschinen und Reifendruckregelung, Kalkung gegen die Versauerung.

Tropischer Latosol: arm unter dem reichsten Wald. Der Latosol hat wegen des Kaolinits und des geringen Humusgehalts nur eine sehr kleine KAK. Die Nährstoffe des Regenwalds stecken in der Biomasse und werden im kurzgeschlossenen Kreislauf über Pilzgeflechte an den Wurzeln (Mykorrhiza) sofort wieder aufgenommen, bevor der Regen sie auswaschen kann. Wird der Wald gerodet und verbrannt, düngt die Asche den Boden für kurze Zeit; nach zwei bis drei Ernten sind die Nährstoffe ausgewaschen oder abgeerntet. Auf freiliegendem Boden können Eisenoxide zu ziegelharter Kruste verhärten (**Laterit**). Der traditionelle **Wanderfeldbau** (shifting cultivation) mit langen Brachen von zehn und mehr Jahren war nachhaltig, solange wenige Menschen viel Wald hatten; mit kürzeren Brachen, Dauerweide und großflächigem Soja- und Palmölanbau wird der Boden degradiert. Nachhaltige Ansätze sind **Agroforstsysteme** (Stockwerkanbau aus Bäumen, Sträuchern und Feldfrüchten, der die Struktur des Waldes nachahmt), Mulch und Leguminosen, und die Lehre aus der **Terra preta**: Indigene Völker Amazoniens erzeugten durch Holzkohle, Küchenabfälle und Dung über Jahrhunderte schwarze, fruchtbare Böden, die bis heute ertragreich sind.

10.5 Böden schützen

Böden sind weltweit durch viele Eingriffe gefährdet:

- **Erosion** durch Wasser und Wind auf ungeschützten Flächen;
- **Verdichtung** durch schwere Maschinen; das Porenvolumen sinkt, Wasser staut, Wurzeln dringen nicht mehr ein;
- **Humusverlust** durch Umbruch von Grünland, Entwässerung von Mooren, einseitige Fruchtfolgen;
- **Versalzung** durch Bewässerung ohne ausreichende Entwässerung in Trockengebieten;
- **Versauerung** und **Schadstoffeinträge** (Schwermetalle, Pestizide, Mikroplastik);
- **Versiegelung** und **Flächenverbrauch**: In Deutschland wurden in den Jahren 2020 bis 2023 im Mittel täglich etwa 51 ha neu als Siedlungs- und Verkehrsfläche ausgewiesen (UBA); Ziel der Bundesregierung sind weniger als 30 ha pro Tag bis 2030.

Nachhaltige Bodennutzung erhält die Bodenfunktionen für kommende Generationen: Böden bedeckt halten, Humus aufbauen, Nährstoffkreisläufe schließen, Verdichtung vermeiden und Flächen sparen. In Deutschland regelt das Bundes-Bodenschutzgesetz den Schutz der Bodenfunktionen; die „gute fachliche Praxis“ in der Landwirtschaft verlangt Erosionsschutz und den Erhalt der organischen Substanz.

Fachbegriffe
Bodenfruchtbarkeit: Fähigkeit eines Bodens, Pflanzen als Standort zu dienen und dauerhaft Erträge zu ermöglichen
Kationenaustauschkapazität: Menge austauschbar gebundener Kationen, die ein Boden an Ton und Humus speichern kann ($cmol_c$ pro kg)
Ton-Humus-Komplex: stabile Verbindung aus Tonmineralen und Huminstoffen, die Kationen bindet und das Krümelgefüge bildet
Wasserhaushalt: beim Boden: Aufnahme, Speicherung (nutzbare Feldkapazität) und Abgabe von Wasser; bestimmt durch Bodenart, Porengröße und Humus

Üben: **noctua** ↗

