

Der Boden als Waldstandort

1	Einführung	158
	1.1 Der Waldboden und seine Funktionen	158
	1.2 Vom Urwald zur naturnahen Forstwirtschaft	159
2	Der Aufbau des Waldbodens	161
	2.1 Charakteristische Waldbodenhorizonte	161
	2.2 Humusformen	161
3	Nährstoffe im Waldboden	165
	3.1 Nährstoffkreisläufe	165
	3.2 „Basenpumpen“	166
	3.3 Mykorrhiza – Symbiose von Wurzel und Pilz	167
4	Gefährdungen des Waldbodens und die Folgen	170
	4.1 Bodenversauerung	170
	4.2 Überdüngung des Waldbodens durch Stickstoffeinträge	172
	4.3 Waldschäden und der Zustand des Waldbodens	173
	4.4 Bodenschutz im Wald	175





Der Boden als Waldstandort

Böden unter Wald (Waldböden) sind im Vergleich zu den intensiv vom Menschen genutzten Agrarböden in einem sehr naturnahen Zustand. Sie bilden die Grundlage für ein intaktes Waldökosystem mit seinen vielfältigen Funktionen im Naturhaushalt der Erde. Waldböden sind Teil dieses Ökosystems und regeln in ihm die Wasser- und Nährstoffkreisläufe. Der Einfluss des Menschen auf seine Umwelt wirkt sich zunehmend auch auf den Waldboden aus.

1 Einführung

1.1 Der Waldboden und seine Funktionen

Boden und Vegetation sind fest miteinander verknüpft: Der Boden ist einer der maßgeblichen Faktoren für die Zusammensetzung der Vegetation, die Pflanzendecke wiederum ist einer der Faktoren für die Intensität und die Richtung der Bodenentwicklung. Dies trifft heute in besonderem Maße für Waldböden und die Waldvegetation zu, da hier

der direkte Eingriff des Menschen im Vergleich zu anderen Standorten noch verhältnismäßig ungestörte Entwicklungen zulässt. Allerdings beeinflussen und belasten die über die Luft in die Waldböden eingetragenen Schadstoffe das natürliche Wirkungsgefüge, wodurch Gefahren für das gesamte Waldökosystem entstehen. Auch forstwirtschaftlich notwendige Maßnahmen können Auswirkungen auf die Böden haben.

Aufgrund ihrer wichtigen ökologischen Funktionen innerhalb des Waldökosystems bedürfen Waldböden eines besonderen Schutzes. Zu diesen Funktionen gehören:

- die Reinigung des Niederschlagswassers, das den Oberflächengewässern und dem Grundwasser zufließt und damit die Qualität des Trinkwassers beeinflusst (Filter- und Pufferfunktion),
- der Hochwasser- und gleichzeitig auch Erosionsschutz durch die Zwischenspeicherung des Niederschlagswassers (Ausgleichsfunktion),

C1 | Intakte Waldökosysteme benötigen gesunde Böden.



- die Grundlage des Waldwachstums und damit die Sicherung der erneuerbaren Ressource Holz (Produktionsfunktion), des Lebensraumes für zahlreiche Pflanzen und Tiere (damit der Biodiversität) sowie der Stabilisierung des Klimas (Klimaschutzfunktion, insbesondere durch die Fixierung des atmosphärischen Kohlendioxids CO₂ und die Freisetzung von Sauerstoff O₂).

1.2 Vom Urwald zur naturnahen Forstwirtschaft

In Bayern sind heute 35 % der Landesfläche von Wäldern bedeckt, womit Bayern im Vergleich zu Deutschland (29 %) und Europa (32 %) verhältnismäßig große Waldgebiete besitzt. Ohne die rodende Tätigkeit des Menschen wäre aufgrund der klimatischen Verhältnisse unserer Breiten die Waldbedeckung in Mitteleuropa sogar nahezu flächendeckend. Diese geschlossene Waldvegetation hatte sich schrittweise mit der Klimaerwärmung nach dem Ende der letzten Eiszeit seit ca. 16.000 Jahren entwickelt. Spätestens seit Beginn der Eisenzeit (ca. 800 v. Chr.) wurde die ursprüngliche Waldverbreitung immer weiter zu Gunsten von Landwirtschafts- und Siedlungsflächen zurückgedrängt. Heute finden sich größere Waldgebiete häufig auf wenig ertragreichen Böden oder in Gebieten mit schwierig zu bearbeitender Reliefsituation. Daher sind für Waldstandorte meist nährstoffarme oder flachgründige Böden typisch (z. B. flachgründige Rendzinen, sehr sandige Böden besonders in Hanglage, Podsole auf nährstoffarmem Untergrund wie Granit oder Gneis, Gleye als Standort für Auenwälder). In einigen Fällen trugen auch frühere Besitzverhältnisse oder Nutzungsformen, wie z. B. die Nutzung als fürstliches Jagdrevier, zum Erhalt der Wälder bei.

Bereits sehr früh nahm der Mensch Einfluss auf das Waldökosystem und damit auch auf den Waldboden. So bedeutete die traditionelle Nutzung des Waldes und seiner Vegetation als Nahrungsgrundlage für Mensch („Jäger und Sammler“) und Tier („Waldweide“), als Lieferant für Baumaterial, Ackerdünger und Viehstreu („Streunutzung“) schon einen ersten Eingriff. Vor allem die Streunutzung wirkte sich durch die Entnahme von Biomasse störend auf den Stoffkreislauf zwi-

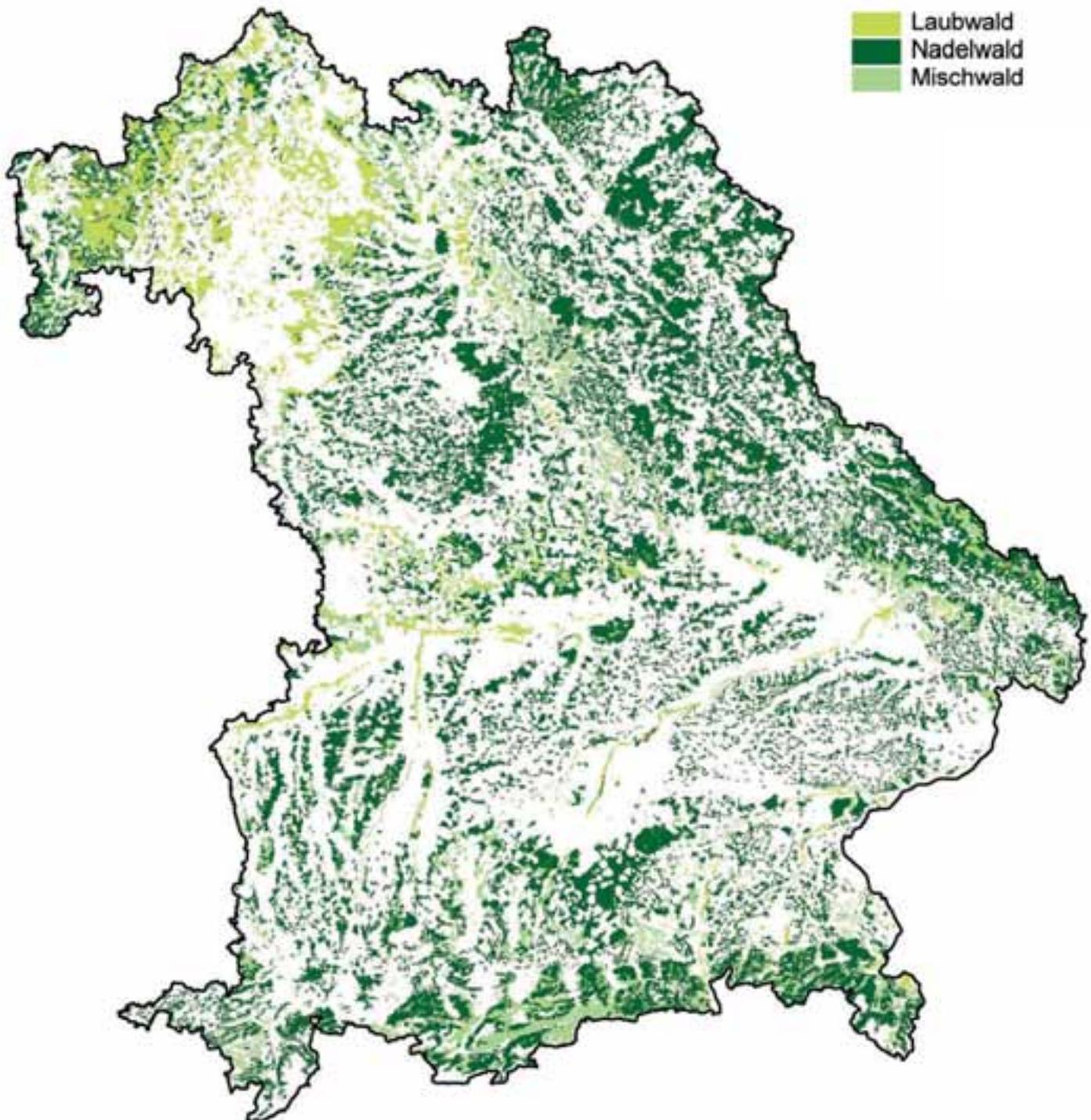
sehen Waldvegetation und Waldboden aus. Mit der früher üblichen Anpflanzung rasch wachsender, meist jedoch nur wenig an die jeweiligen Standortbedingungen angepasster Baumarten im Zuge der forstwirtschaftlichen Nutzung des Waldes wurde nicht nur



die ursprüngliche Waldvegetation verändert, sondern auch Einfluss auf das sensible Wirkungsgefüge zwischen Vegetation und Waldboden ausgeübt. Heute ist es integraler Bestandteil der naturnahen Forstwirtschaft neben der Schaffung von Mischwäldern, die Leistungsfähigkeit und Produktionskraft der Waldböden zu erhalten.

Eigentlich sind nahezu alle Böden Mitteleuropas im Zuge der nacheiszeitlichen Entwicklung der flächendeckenden Waldvegetation als Waldböden entstanden. Doch haben die veränderten Nutzungsformen die Ausprägung und nachfolgende Entwicklung dieser heute nicht mehr von Waldvegetation bzw. Forstbestandenen Böden dauerhaft verändert. Insbesondere die Stoffkreisläufe des Waldökosystems und die im Gegensatz zu landwirtschaftlichen Böden geringe Bearbeitung durch den Menschen unterscheiden die Waldböden von den Böden an anderen Vegetations- und Nutzungsstandorten.

C2 | *Erholungsgebiet des Menschen, vor allem aber Lebensraum zahlreicher Lebewesen und Pflanzen sowie Träger wichtiger Funktionen im Wasserkreislauf und für das Klima: Das Waldökosystem, zu dem auch der Waldboden gehört.*



2 Der Aufbau des Waldbodens

2.1 Charakteristische Waldbodenhorizonte

Der Begriff „Waldboden“ bezeichnet keinen bestimmten → Bodentyp. Vielmehr fasst er alle natürlichen Böden unter Waldbestand zusammen, deren Kennzeichen die weitgehend ungestörte Abfolge der Bodenhorizonte und die → Waldstreu sind. Diese unter Wald typische Streuauflage (L-Horizont; Symbolbeschreibung ↗ C6) besteht aus abgestorbenen, jedoch noch weitgehend unzersetzten Pflanzenbestandteilen (z. B. Nadeln, Laub, Zweige, Früchte) und gehört als oberster (Teil-) Horizont zur organischen Auflage (= Humusauflage) des Bodens. Aus der Zersetzung der Streuauflage durch die → Destruenten (z. B. Bodentiere, Pilze, Bakterien) entstehen neue organische und mineralische Stoffbestandteile des Bodens, die sich zunächst unterhalb der Streuauflage in weiteren Teilhorizonten der Humusauflage anreichern (Of-, Oh-Horizont). Über das Sickerwasser und die Tätigkeit der bodenwühlenden Organismen gelangen die Bestandteile der Humusauflage in den mineralischen Oberboden (A-Horizont). Aufgrund ihrer großen Nährstoff- und Wasserspeicherkapazität ist die Humusauflage für die Waldernährung und den Bodenwasserhaushalt von zentraler Bedeutung. Darüber hinaus trägt der Humus zur Stabilisierung des Bodengefüges bei.

2.2 Humusformen

Zu den drei wesentlichen Formen der Humusauflage (Humusformen) unter Wald gehören Mull, Moder und Rohhumus. Ihre individuelle Ausprägung variiert in Abhängigkeit von den Standorteigenschaften, besonders der Zersetzbarkeit des pflanzlichen Ausgangsmaterials (Laubstreu wird schneller zersetzt als Nadelstreu, ↗ Tabelle C1), der Nährstoffausstattung des Unterbodens und der lokalen Temperatur- und Niederschlagsverhältnisse. Anhand einiger typischer Kennzeichen lässt sich eine Charakterisierung der Humusformen vornehmen:

Mull findet sich vorwiegend auf nährstoffreichen Böden, die mit Laubbäumen bestanden sind (z. B. kalkreiche Böden unter Bu-



chenwald), während Rohhumus meist auf nährstoffarmen Böden mit Fichten- oder Kiefernbestand dominiert. Die Zwischenform Moder kommt im Überlappungsbereich der beiden Extreme vor. Der typische Moder bildet sich dabei häufig unter Fichtenbestand auf Böden mit unterschiedlicher Nährstoffausstattung. Die einzelnen Humusformen unterscheiden sich in der Ausprägung ihrer Teilhorizonte, in denen jeweils verschiedene Zersetzungsstadien des abgestorbenen Pflanzenmaterials erkennbar sind. Gesteuert wird die Ausbildung der Horizonte durch

C4 | Waldböden zeigen meist einen weitgehend ungestörten Aufbau. Hier abgebildet ist ein Podsol mit Humusauflage (rohhumusartiger Moder) über dem schwarzgefärbten Ah-Horizont und den gebleichten Ahe. 

Laubstreu		Nadelstreu
leichter zersetzbar	schwerer zersetzbar	sehr schwer zersetzbar
Schwarzerle	Linde	Fichte
Weißerle	Eiche	Kiefer
Esche	Birke	Douglasie
Traubenkirsche	Buche	Lärche
Hainbuche	Bergahorn	
Ulme	Roteiche	
	Pappel	

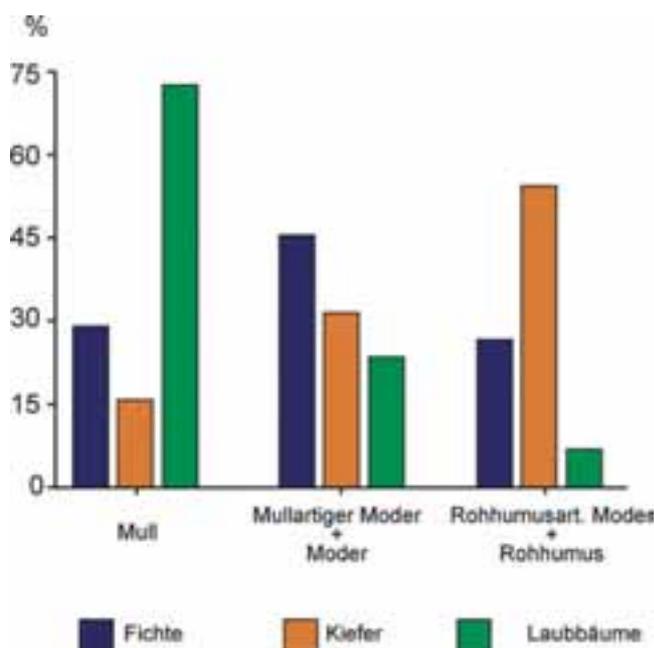
Tabelle C1 | Zersetzbarkeit der Streu verschiedener Baumarten.

Beispiele für C/N-Verhältnisse lebender Gewebe:

(nach Hintermaier-Erhard & Zech, 1997)

Würmer	5 ± 1
Gras	25 ± 7
Blätter, Laubbäume	40 ± 10
Nadeln, Koniferen	60 ± 20
Getreidestroh	95 ± 5
Laubholz	250 ± 150
Nadelholz	250 ± 150

Tabelle C2



C5 | Typische Humusformen unter verschiedenen Baumarten.

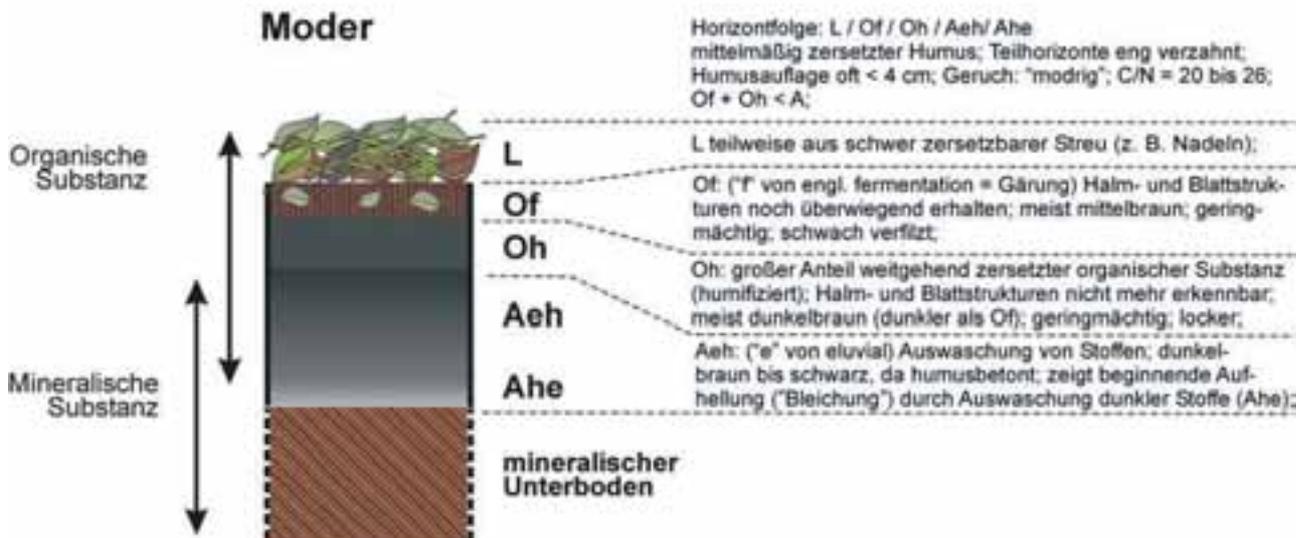
die unterschiedliche Zersetzungsdauer der organischen Substanz in den jeweiligen Humusformen. So dauert die vollständige Streuzersetzung beispielsweise in einem Buchenwald bis zu 10 Jahre, während sie in einem typischen Auenwald nur etwa ein Jahr benötigt. Ein gutes Maß für die Zersetzbarkeit der organischen Substanz ist das in ihr vorliegende Verhältnis aus den Elementgehalten an Kohlenstoff (C) zu Stickstoff (N), das sog. → „C/N-Verhältnis“. Dieses kann chemisch im Analyselabor bestimmt werden. Dabei gilt: je kleiner das C/N-Verhältnis, desto schneller wird das betreffende organische Material abgebaut.

Mull besteht aus einer meist nur geringmächtigen Streulage (L-Horizont), die dem humosen mineralischen Oberboden, dem Ah-Horizont, direkt auflagert. Die Streuzersetzung verläuft sehr schnell und findet überwiegend

in diesem Horizont statt. Wesentlich für einen Mull ist sein hoher pH-Wert, der die biologische Aktivität fördert. Durch eine ausgeprägte Tätigkeit bodenwühlender Bodentiere (→ Bioturbation) wird die organische Substanz in den Mineralboden eingemischt, so dass es zu hohen Humusgehalten im Ah-Horizont kommt. Für die Bildung von Mull ist die leichte Abbaubarkeit der Vegetationsrückstände Voraussetzung (z. B. Laub). Diese Humusaufgabe stellt die für die Bodenfauna und -flora günstigste Form dar, da sie besonders nährstoffreich ist.

Moder bildet eine Übergangsform zwischen Mull und Rohhumus und kann deshalb auch als mullartiger oder rohhumusartiger Moder ausgebildet sein. Die Streuzersetzung findet überwiegend in der organischen Auflage statt und verläuft aufgrund eines hohen Anteils schwer zersetzbarer Pflanzenreste (z. B. Nadeln) und geringerer biologischer Aktivität langsamer als im Mull. Kennzeichnend ist die Ausbildung weiterer Teilhorizonte in der Humusaufgabe. Bei einem typischen Moder folgen unter dem L-Horizont die geringmächtigen Of- und Oh-Horizonte (Charakterisierung → C6). Der unter der Humusaufgabe liegende Ahe-Horizont zeigt oft eine beginnende farbliche Aufhellung („Bleichung“). Diese wird durch die Lösung und Verlagerung der dunklen Eisen- und Manganoxide, welche die Mineralkörner umkrusten, sowie teilweise durch die Auswaschung von gelösten organischen Substanzen (z. B. Huminstoffe) verursacht. Oxide und organische Bestandteile werden dabei in die tieferen Horizonte verlagert (► Modul A „Was ist Boden?“ → Podsolierung).

Rohhumus bildet sich wie Moder an Standorten, an denen die Pflanzenreste in der Streuaufgabe (nahezu ausschließlich Nadeln) nur sehr langsam zersetzt werden. Neben der Art der Streu wirken sich hier die hohen Niederschläge und geringen Bodentemperaturen hemmend auf den Abbau der organischen Substanz aus. Die damit verbundene Nährstoffarmut und eine saure Bodenreaktion durch die freigesetzten Huminsäuren bilden ungünstige Bedingungen für die Bodenflora und -fauna. Als Folge davon verkümmert die biologische Aktivität im Boden, was wiederum die Umsetzung der Streu weiter verlangsamt. Der Rohhumus ist



C6 | Aufbau und Charakteristika der Humusformen Mull, Moder und Rohhumus.

Wurzeln – Nährstoffversorgung und Verankerung

Während die Feinwurzeln eines Baumes die Aufnahme von Nährstoffen und von Wasser aus dem Boden ermöglichen, dienen die größeren Wurzeln (Stark- oder Grobwurzeln) seiner Verankerung im Untergrund. Dabei stellen Pfahl-, Senker- und Herzwurzel die drei grundlegenden Grobwurzelformen von Bäu-

men in Mitteleuropa dar. Welche Wurzelform ein Baum ausbildet, ist genetisch vorgeprägt. Allerdings erfolgt oftmals eine dem Baum aufgezwungene Anpassung an die am Standort gegebene Untergrundsituation, z. B. durch undurchdringliche Stein- oder Felsschichten, verhärtete Bodenhorizonte oder durch Stau-nässe. So kann durch eine nicht an den Wald-baum und sein Wurzelsystem angepasste forstliche Standortwahl ein verringertes Standvermögen entstehen. Auf flachgründigen sandigen Böden führt beispielsweise die Anpflanzung der Fichte zur Ausbildung oberflächennaher Wurzelsysteme, den sogenannten Wurzeltellern. Als Folge der damit nur geringen Standfestigkeit werden Bäume mit Wurzeltellern bei Sturm verhältnismäßig leicht ausgehebelt (↗ C7).

Auch Verdichtungen des Bodens durch Ton-anreicherungshorizonte (beispielsweise bei der Parabraunerde) führen durch Stau-nässe und Sauerstoffmangel zur Ausbildung von flachen Wurzeltellern. Während Fichte und Rot-buche besonders sensibel auf Stauwasser reagieren, sind Kiefer und Tanne verhältnismäßig stauwasserunempfindlich und werden demnach ihr Pfahlwurzelssystem auch bei derartigen Bodenverhältnissen ausbilden.

Exkurs

C7 | Folge flachgründiger Durchwurzelung – Windwurf.



Herzwurzel		Pfahlwurzel	Senkerwurzel
			
Lärche	Schwarzerle	Tanne	Fichte
Douglasie	Buche	Kiefer	

Tabelle C3 | Verankerung und Bodenkontakt: Wurzelformen heimischer Baumarten. Baumtypische und angepasste (in Klammern) Wurzelformen mitteleuropäischer Waldbäume.

innerhalb der Humusaufgabe durch eine ausgeprägte Horizontdifferenzierung charakterisiert. Unter dem deutlichen L-Horizont folgen der Of-, darunter der oft kompakte Oh-Horizont. Die bisweilen beim Moder erkennbare Aufhellung des A-Horizontes (daher Aeh-Horizont) ist bei einem Rohhumus weit ausgeprägter bis hin zu einer nahezu vollständig flächigen Bleichung (Ae-Horizont).

Die besonders bei den Humusformen Moder und Rohhumus entstehenden wanderungsfähigen Huminstoffe können mit dem Niederschlags- und Sickerwasser leicht ausgewaschen werden. Bei größeren Regenereignissen sind sie daher Ursache für die typische dunkelbraune „Cola“-Färbung von Waldbächen. Sie lässt sich durch das Aufschütteln von Humus in einer Wasserlösung leicht zeigen (► Schüleraktivität C2).



C8 | Die dunkelbraune „Cola“-Färbung von Waldbächen wird nach ergiebigen Niederschlägen durch leicht lösliche Huminstoffe verursacht. **CD**

3 Nährstoffe im Waldboden

3.1 Nährstoffkreisläufe

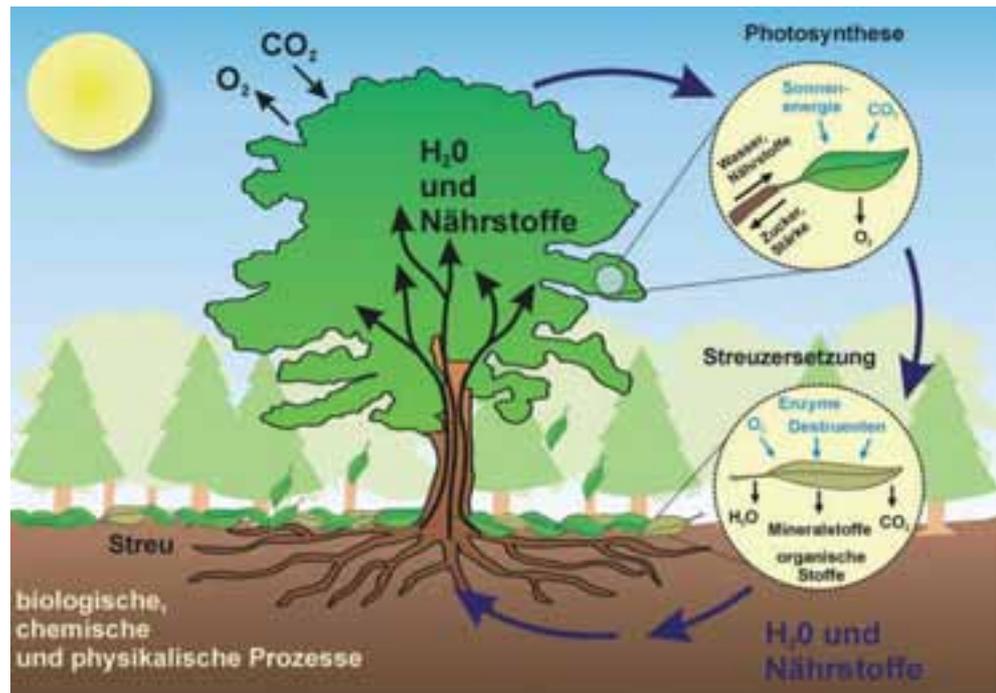
Wie in allen anderen Ökosystemen zirkulieren die für den Aufbau von organischer Substanz wichtigen Elemente auch im Waldökosystem in ständigen Stoffkreisläufen. Für die Aufrechterhaltung der Kreisläufe und die Verteilung der Nährstoffe üben der Waldboden und das durch sein Porensystem wandernde



Bodenwasser zentrale Funktionen aus. Über das Bodenwasser werden die für das Pflanzenwachstum wichtigen Hauptnährelemente Stickstoff, Kalium, Calcium, Magnesium, Phosphor und Schwefel den Wurzeln des Baumes zugeführt, größtenteils in gelöster Form als Ionen. Von den Wurzeln aufgenommen, erreichen die mineralischen Nährstoffe über das Leitungsbahnensystem die höheren Bereiche der Pflanzen. Im Wesentlichen über die biologische Zersetzung der zu Boden fallenden Blätter, Nadeln, Äste, Blüten und Früchte oder des abgestorbenen Baumes selbst werden die in der Pflanze gebundenen Nährstoffe wieder freigesetzt und gelangen durch das Sickerwasser in den Boden. Mit der erneuten Aufnahme der Nährstoffe durch die Wurzeln der Pflanzen schließt sich der Kreislauf. Dieses System wird durch sogenannte Kronenraumprozesse beeinflusst. So werden Stoffe von außen eingetragen, z. B. durch das Auskämmen von Nähr-, aber auch von Schadstoffen aus der Atmosphäre durch die Waldkrone oder die Aufnahme direkt aus der Atmosphäre (in Mitteleuropa häufig von Stickstoff). Nährstoffe können aber auch aus dem Kronenraum selbst mobilisiert werden, z. B. durch die Auswaschung

C9 | Gewinnung ungestörter Bodenproben zur Untersuchung der komplexen Stoffverlagerungsprozesse in Waldböden.

C10 | Der Nährstoffkreislauf im Wald. 



von Kalium durch den Regen. Über den → Stammablauf erreicht ein Teil der Nähr- und Schadstoffe aus dem Kronenraum den Boden in erhöhten Konzentrationen.

3.2 „Basenpumpen“

Tiefwurzeln Bäume besitzen im Nährstoffkreislauf eine wichtige ökologische Bedeutung als sogenannte Basenpumpen. Mit der fortschreitenden Entwicklung werden aus den Böden des Waldes die basisch wirkenden Nährstoffe (Calcium, Kalium, Magnesium) ausgewaschen und mit dem Sickerwasser in die tieferen Bodenhorizonte

verlagert. Als Folge davon unterliegt der Oberboden einer natürlichen Bodenversauerung, die durch den Eintrag von Luftschadstoffen und deren Wechselwirkung im Boden verstärkt wird. Durch tief wurzelnde Baumarten kann die Versauerung im Oberboden über die Aufnahme basischer Nährstoffe durch die Wurzeln im Unterboden teilweise wieder kompensiert werden. Über das Wurzel- und Leitungssystem des Baumes werden die Nährstoffe wieder an die Oberfläche und über den Stoffkreislauf in den Oberboden zurückgeführt. Neben der Rückführung der Nährstoffe bedeutet die dadurch bedingte Erhöhung des → Säurepufferver-



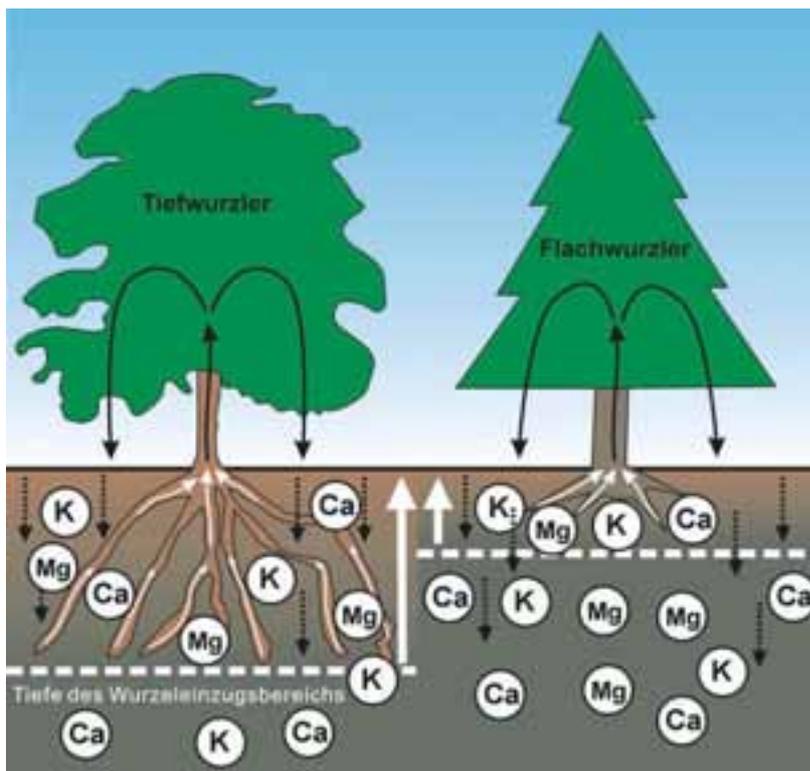
C11 | Links: Messung des Wassertransportes im System Boden – Baum – Atmosphäre. Rechts: Über den Stammablauf gelangen Nähr- und Schadstoffe konzentriert in der Umgebung des Baumes in den Boden. Messstelle zur Erfassung der Zusammensetzung des Stammablaufes auf einer Waldbodenbeobachtungsfläche.

mögens und der Bodenfruchtbarkeit eine wichtige Voraussetzung für die Erhaltung der Bodenqualität. Besonders geeignet ist die tiefwurzeln Buche, deren Laub zudem schnell zersetzt werden kann.

3.3 Mykorrhiza – Symbiose von Wurzel und Pilz

Pflanzen decken ihren Nährstoffbedarf nur teilweise dadurch, dass sie die Nährstoffe über ihre Feinwurzeln direkt aus dem Bodenwasser beziehen. Eine besondere Bedeutung hat die indirekte Wasser- und Nährstoffaufnahme über die Symbiose der Waldpflanze bzw. ihres Wurzelsystems mit einem dort siedelnden Pilz, der sogenannten → Mykorrhiza („Pilzwurzel“). Dabei liegt die Funktion der Pilze in der Beschleunigung der Wasser- und Nährstoffaufnahme sowie in der Erschließung der für den Symbiosepartner schlecht oder nicht verfügbaren Nährstoffe. Dazu gehören insbesondere die für das Wachstum wichtigen Nährelemente Stickstoff und Phosphor. Mykorrhiza-Pilze übernehmen darüber hinaus die Produktion von Hormonen und von Abwehrstoffen gegenüber Krankheitserregern. Die innige Vernetzung zwischen den Feinwurzeln des Baumes mit dem im Waldboden weit verzweigten Geflecht der → Pilzhypen erweitert die für die Wasser- und Nährstoffaufnahme dem Baum zur Verfügung stehende Gewebeoberfläche beträchtlich. Im Rahmen der symbiotischen Verbindung gibt der Pilz Nährstoffe an die Pflanzenwurzel weiter, während die Pflanze im Gegenzug die Mykorrhiza-Pilze mit Kohlenhydraten versorgt. Da Pilze kein Blattgrün (Chlorophyll) besitzen, können sie auch keine Photosynthese zur eigenen Kohlenhydratproduktion betreiben.

Man geht heute davon aus, dass alle heimischen Baumarten in einer engen Symbiose mit Pilzen leben. Einen bedeutenden Anteil dieser Mykorrhiza-Pilze bilden die unscheinbaren, meist mikroskopisch kleinen Schlauchpilze. Aber auch andere Pilzarten, die aufgrund ihres Fruchtkörpers als „Speisepilz“ viel bekannter sind, leben häufig in enger Verbindung mit Baumwurzeln. Bei einigen dieser Pilzarten ist diese Gemeinschaft spezifisch, so dass der Name der betreffenden Baumart teilweise im volkstümlichen Namen des Pil-

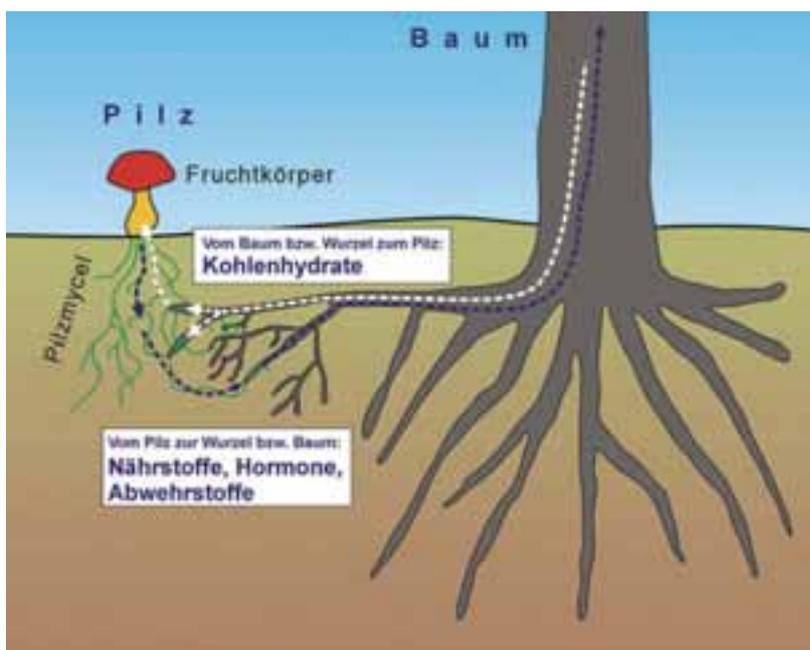


C12 | Wirkungweise von Tiefwurzlern als „Basenpumpen“. Während Tiefwurzler Nährstoffe auch aus tieferen Bodenschichten wieder an die Oberfläche holen können, verarmen bei Flachwurzlern die Oberböden zunehmend an Nährstoffen. Diese verlagern sich – für die Baumwurzeln nicht mehr erreichbar – in den tieferen Teil des Bodens. Die Verlagerung der basisch wirkenden Kationen führt zu einer natürlichen Versauerung der höheren Bodenschichten. [CD](#)

zes auftaucht. Beispiele für solche Baum-Pilz-Symbiosen sind Birke und Birkenpilz, Fichte und Fichtenreizker, Eiche und Steinpilz, Kiefer und Butterpilz.

DVD | Mykorrhiza.

C13 | Lebensgemeinschaft Baumwurzel – Pilz. [CD](#)





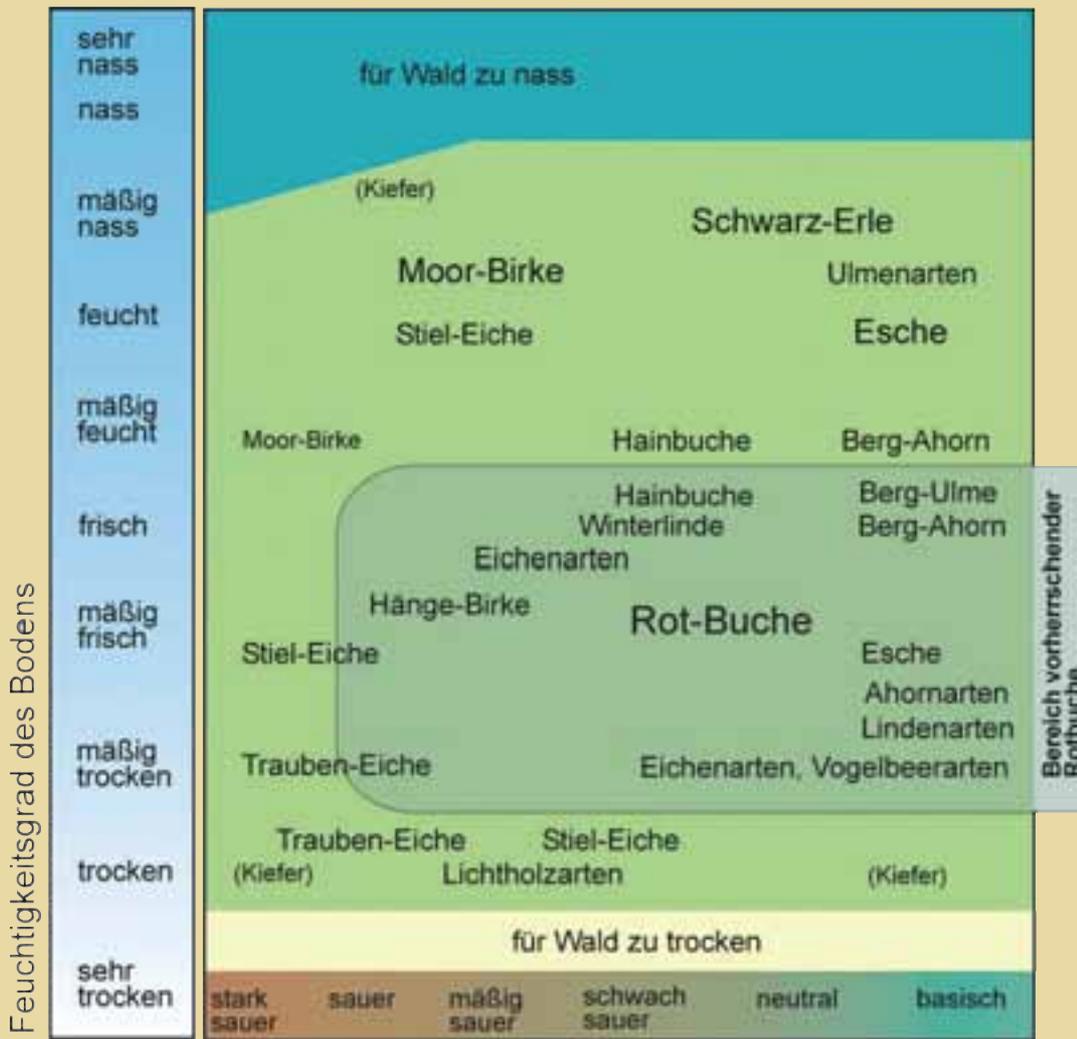
Standorteigenschaften von Waldböden

Die durch den Boden gegebenen Standorteigenschaften beeinflussen sowohl das Vorkommen einer Pflanzenart als auch die Stoffflüsse im Waldökosystem. Für Waldpflanzen wichtige Bodenstandorteigenschaften sind insbesondere der Wassergehalt (Bodenfeuchte), die Bodenreaktion (pH-Wert), die Nährstoffversorgung (→ Basensättigung und Nährstoffverfügbarkeit), die Bodentemperatur und die Durchwurzelbarkeit. Dabei sind die Pflanzenarten an verschiedene Böden unterschiedlich gut angepasst. Dementsprechend bestimmen die Bodeneigenschaften das Vorkommen und die Häufigkeit der Pflanzen mit. Einige Pflanzenarten sind sogar entweder so sehr spezialisiert oder derart überdurchschnittlich tolerant, dass sie für bestimmte Boden- oder Umwelteigenschaften regelrecht als Indikator dienen können. Solche spezialisierten, ansonsten jedoch meist konkurrenzschwachen Arten werden daher als → Zeiger- oder Indikatorpflanzen bezeichnet (► Modul B Bodenleben). Dagegen gedeiht die Mehrheit der Pflanzenarten tendenziell am besten bei einer mittleren Bodenfeuchte und Basenversorgung des Bodens (↗ C16).

C14 | Typische Zeigerpflanzen im Wald.
Oben: Leberblümchen
Unten: Heidelbeere (links) und Farn (rechts), Zeigerpflanzen für saure Standortbedingungen.

C15 | Kommt meist an trockenen und sauren Standorten vor – die Kiefer.





Säuregrad des Bodens

C16 | Bodenstandortfaktoren und das Durchsetzungsvermögen von Waldbaumarten unter mitteleuropäischen Konkurrenzbedingungen (Ökogramm). CD

Im Wald konkurrieren unterschiedlich gut an den jeweiligen Standort angepasste Pflanzenarten neben Licht um die ebenso lebensnotwendigen Bodenressourcen wie Wasser und Nährstoffe. Obgleich die meisten Baumarten, isoliert betrachtet, auf vielen Böden mehr oder minder gut wachsen würden, setzen sich unter der natürlichen Konkurrenzsituation im Wald meist nur relativ wenige oder sogar nur eine dominante Art an einem bestimmten Standort durch. Der Einfluss des Bodenwasserhaushalts und der Bodenreaktion auf die dominierende Baumart lässt sich

anschaulich in einem sogenannten Ökogramm darstellen. Es zeigt für die jeweiligen Standortbedingungen die Dominanzbereiche bzw. die Einnischung der einzelnen Baumarten als das Ergebnis des Konkurrenzwettkampfes aller beteiligten Baumarten. Unter natürlichen, nicht durch den Menschen beeinflussten Bedingungen sollte beispielsweise in Mitteleuropa die Rotbuche aufgrund ihrer großen Toleranzbreite und ihrer Durchsetzungskraft in in den meisten Wäldern ohne extreme Standortverhältnisse vorherrschen.



4 Gefährdungen des Waldbodens und die Folgen

C17 | Ein Schadensbild aus dem Komplex der „Neuartigen Waldschäden“, bei dem Bodenversauerung eine wichtige Rolle spielt.

Gefährdungen des Waldbodens gehen besonders von den über die Luft und den Niederschlag eingetragenen Schadstoffen aus. Die Konzentration von Schwermetallen und organischen Problemstoffen ist in der organischen Auflage des Waldbodens oft höher als in landwirtschaftlich genutzten Böden, da in letzteren durch die Bearbeitung eine regelmäßige Durchmischung und damit Verdünnung dieser Stoffe erfolgt. Die Filterwirkung der Baumkronen (Auskämmen) führt vielerorts zu besonders hohen Säureeinträgen aus der Luft in den Waldboden.

4.1 Bodenversauerung

Unter den in Mitteleuropa herrschenden Klimabedingungen führt der Eintrag von natürlichen Säuren durch den Niederschlag (im Regen gelöstes CO_2 reagiert schwach sauer) und durch bodeninterne Prozesse (Wurzelatmung, Nährstoffaufnahme, Oxidation von Schwefel- und Stickstoffverbindungen, Hu-

mifizierung) zu einer allmählichen Versauerung vieler Böden. Zu einem der typischen Waldböden, der sich als Folge dieser natürlichen Bodenversauerung ausbildet, gehört der Podsol. Er stellt im fortgeschrittenen Versauerungsstadium das Endstadium einer natürlichen Bodenentwicklungsreihe dar.

Das Ausmaß der Bodenversauerung hängt grundsätzlich davon ab, wie groß die Fähigkeit des Bodens ist, die bei der Säurereaktion freiwerdenden H^+ -Ionen zu puffern (\rightarrow Pufferkapazität). Durch den zusätzlichen Eintrag von anthropogen freigesetzten H^+ -Ionen mit dem \rightarrow sauren Regen wird die natürliche Versauerung verstärkt, da dann die Pufferkapazität vieler Böden überschritten wird. Ein Großteil der anthropogen freigesetzten Säurebildner besteht aus den durch Industrie, Landwirtschaft und Straßenverkehr in die Atmosphäre emittierten Gasen Schwefeldioxid (SO_2) und verschiedenen Stickoxiden (NO_x). Diese Gase verbinden sich mit den

in der Atmosphäre befindlichen Wassertröpfchen zu Säuren und gelangen mit den Niederschlägen in den Waldboden. Beim Durchgang des Regenwassers durch das Kronendach des Waldes wird der pH-Wert des Regens durch Wechselwirkungen mit den Baumkronen auf einen etwas höheren (weniger sauren) Wert gepuffert. Die Neutralisation der Säuren im Boden erfolgt durch eine Reihe von basisch wirkenden Stoffen, die bei unterschiedlichen pH-Werten reaktiv werdende Puffersysteme bilden (► Modul F Schadstoffe). Der Vorgang der Pufferung besteht darin, dass die H^+ -Ionen in der Bodenlösung durch Reaktion mit den Puffersubstanzen verbraucht werden. Dadurch werden in der Bodenlösung andere positive Ionen freigesetzt (z. B. Al^{3+} , Ca^{2+} , K^+).

In 10–30 cm Bodentiefe haben die Waldböden Bayerns einen mittleren pH-Wert von 4,5 (in Wasser gemessen). Viele Böden, vor allem in Ostbayern, liegen aber unter dem Wert von 4,2 und gehören damit dem Aluminium-Austauscherbereich an. Das bedeutet, dass H^+ -Ionen durch die Freisetzung von positiven Aluminiumionen (Al^{3+}) abgepuffert und damit aus der Bodenlösung entfernt werden. Die freigesetzten Aluminiumionen sind wiederum in der Lage, physiologisch wichtige Nährstoffionen wie z. B. Kalium (K^+), Calcium (Ca^{2+}) und Magnesium (Mg^{2+}) von ihren Plätzen an negativ geladenen → Bodenkolloiden, Tonmineralen und organischen Bodenbestandteilen zu verdrängen (► Modul A „Was ist Boden?“). Diese so ausgetauschten Nährstoffionen werden anschließend mit dem Sickerwasser in tiefere Bodenbereiche und in das Grundwasser ausgewaschen und sind damit für die Pflanzen nicht mehr verfügbar (Basenverarmung). Die Auswaschung von Nährstoffen bedeutet aber nicht nur den unmittelbaren Verlust für die Pflanzen und damit eine Abnahme der Bodenfruchtbarkeit. Sowohl Nährstoffverlust als auch die Verschiebung der Bodenreaktion hin zu einem saureren Milieu beeinträchtigen die Aktivität der Bodenlebewesen negativ. Als Folge davon wird abgestorbenes Pflanzenmaterial weniger schnell abgebaut und die Durchmischungsprozesse innerhalb des Bodens durch die wühlenden Bodenlebewesen verlangsamen sich, wodurch mächtige (Roh-)Humusaufgaben entstehen.



C18 | Silikatreiche („saure“) Ausgangsgesteine, kühl-feuchte Klimaverhältnisse und ein huminsäurereicher Streuabbau fördern die natürliche Versauerung der Böden mit der Ausbildung von Podsolen.



C19 | Oben: Die Podsolierung von Böden mit geringer Pufferkapazität ist heute auch eine Folge der Zufuhr von Säuren über die Niederschläge (Braunerde-Podsol).

Unten: Wichtiger Regulator des Abflusses von Niederschlagswasser – der Waldboden.

Die Freisetzung von dreiwertigen Aluminiumionen (Al^{3+}) infolge einer zunehmenden Versauerung des Bodens bzw. der Waldbodenlösung hat eine schädigende Wirkung auf die Feinwurzeln der Bäume und damit auf die Nährstoff- und Wasseraufnahme der Waldpflanzen. Insbesondere die Mykorrhiza-Pilze reagieren auf die Aluminiumionen empfindlich, bis hin zu einer vollständigen Rückbildung. Auf viele der im Boden lebenden Organismen wirkt sich das Aluminiumion wachstumshemmend und ab einer gewissen Konzentration sogar giftig aus (\rightarrow Aluminiumtoxizität). Seine toxische Wirkung entfaltet das Aluminiumion bei den Bodenpflanzen und -tieren unter anderem dadurch, dass es die Zellmembranen schädigt. Als Konse-

quenz einer hohen Aluminiumionen-Konzentration im Boden nimmt daher die Anzahl der Bodentiere ab, wodurch Streuabbau und Humusbildung sowie die Bodendurchmischung verringert werden.

Waldböden speichern das Niederschlagswasser und geben es nur langsam wieder ab. Daraus erwächst ihnen eine wichtige Funktion bei der natürlichen Regulation des Oberflächenabflusses (\blacktriangleright Modul D Wasser). Die hohe Filterwirkung von Waldstandorten in Bezug auf Schadstoffe im Niederschlagswasser ist von großer Bedeutung für die Trinkwasserqualität. Die mit der Bodenversauerung verbundene Mobilisierung von Schwermetallen (neben Aluminium auch Eisen, Mangan, Zink und Cadmium) und deren Auswaschung über das Sickerwasser führt jedoch zunehmend zu einer Gefährdung der Oberflächengewässer (Flüsse, Seen) sowie des Grund- und Trinkwassers.

In Bayern gelten derzeit nur etwa 30 % der Waldböden aufgrund ihrer guten natürlichen Basenausstattung (\blacktriangleright Modul A „Was ist Boden?“) und ihres relativ hohen pH-Wertes als nicht versauerungsgefährdet, wogegen etwa 25 % der Waldböden versauert sind. Zur Verbesserung der Bodenreaktion wurden daher in den vergangenen Jahren teilweise aufwändige Bodenkalkungen durchgeführt (z. T. Ausbringung durch Hubschrauber). Diese werden nur nach vorherigen sorgfältigen Untersuchungen des Bodenzustandes und der Ernährungssituation der Waldbäume durchgeführt.

4.2 Überdüngung des Waldbodens durch Stickstoffeinträge

Durch den Eintrag (\rightarrow Deposition) von Nähr- und Schadstoffen aus der Atmosphäre gelangt insbesondere das lebenswichtige Nahrungselement Stickstoff in den Boden. Besonders in Waldgebieten, in denen infolge der Luft- und Bodenbelastung Baumschädigungen zur Auflichtung des Kronendaches und damit zu einem erhöhten Lichtangebot am Boden führen, fördern die Stickstoffeinträge bevorzugt das Wachstum von Waldgräsern. Diese Gräser konkurrieren mit den übrigen Waldpflanzen um Nährstoffe und Wasser. Die flächendeckende Beschattung des Bodens durch



die Gräser verhindert Austrieb und Wachstum von Sämlingen zahlreicher Waldpflanzen und führt somit zu einem fortschreitenden Verlust der Biodiversität, d.h. der Artenvielfalt von Waldflora und -fauna. Die Anreicherung von Stickstoff in der Humusaufgabe in sauren Waldböden führt überdies zu einem beschleunigten Humusabbau mit erhöhtem Nitrataustrag über das Boden- und Oberflächenwasser der betroffenen Waldökosysteme.

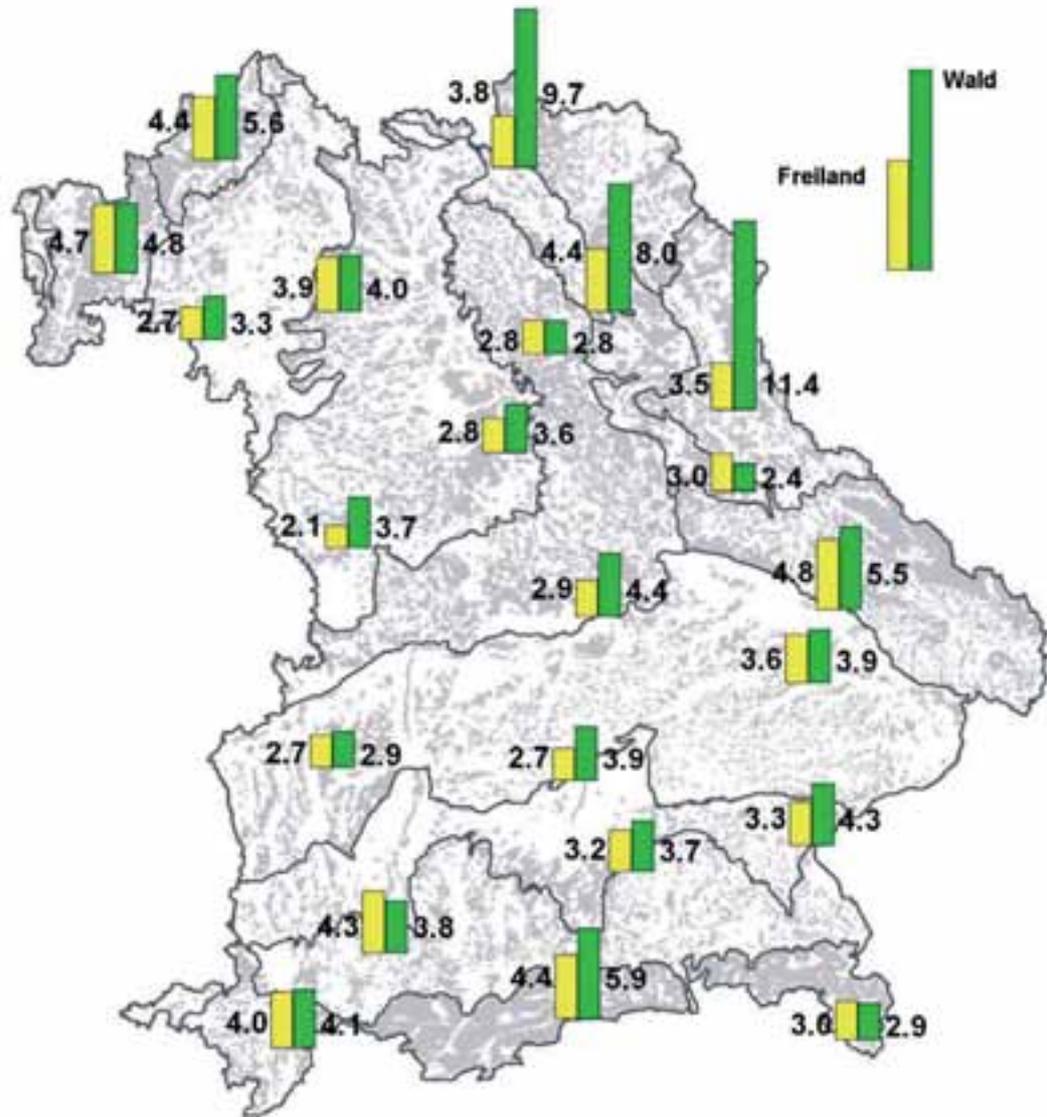
4.3 Waldschäden und der Zustand des Waldbodens

Seit Mitte der 70er Jahre des vergangenen Jahrhunderts wurden an einheimischen Laub- und Nadelwäldern großflächige Schädigungen erkennbar, die unter dem Begriff „Neuartige Waldschäden“ zusammengefasst werden. Die Symptome reichten von Verfärbungen von Blättern und Nadeln und einer zunehmenden Auslichtung der Baumkronen bis hin zum Ab-

sterben von Waldbäumen, besonders in den Hochlagen der Mittelgebirge. Als eine der Ursachen für diese Waldschäden gelten heute Luftschadstoffe, die entweder Blätter und Nadeln direkt schädigen oder in den Boden eingetragen zu einer Verarmung an Nährstoffen und damit zu einer Schädigung der Waldbäume führen. Das Ausmaß der Waldschädigungen wird seit über zwei Jahrzehnten in Waldzustandsberichten erfasst. Diese bewerten nicht nur den Kronenzustand, sondern beziehen auch Schadstoffeinträge und Stoffausträge, die Nährstoffversorgung, den Bodenzustand sowie das Wachstum und die Wasserqualität mit ein. Damit wird ein umfassendes Bild des Waldzustandes gezeichnet.

Um der besonderen Bedeutung des Waldbodens als Grundlage für das Waldwachstum Rechnung zu tragen, wurde als Ergänzung zu den jährlichen Waldzustandsberichten eine gesonderte Bodenzustandserhebung (BZE) in den Jahren 1987 bis 1993 bundes-

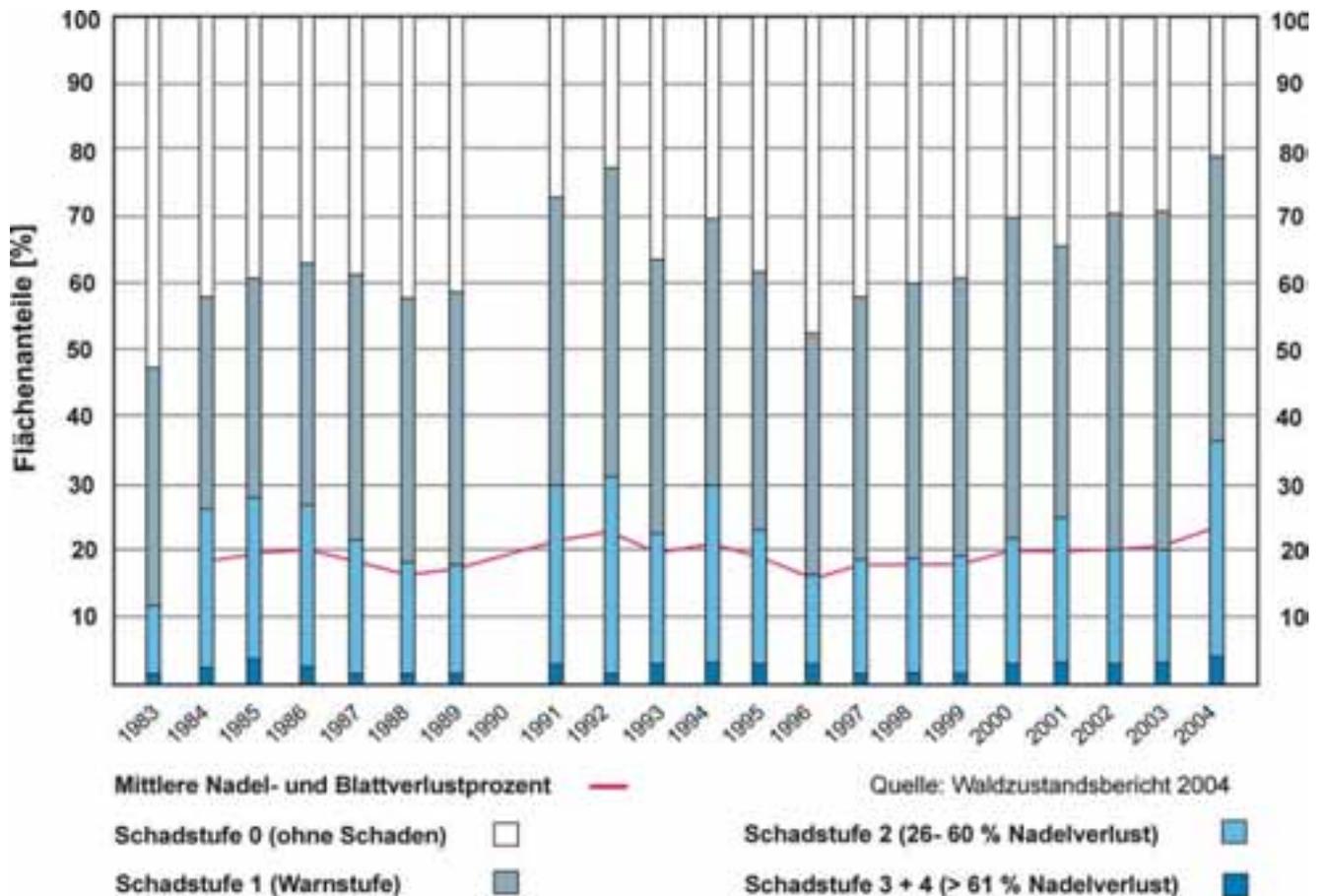
C20 | *Flächendeckende Ausbreitung von Gräsern im Wald als Folge der Auflichtung des Kronendaches und hohen Stickstoffeintrages aus der Atmosphäre.*



C21 | Über Luftschadstoffe eingetragene Mengen an Schwefel (in kg/ha) für das Jahr 2003, gemessen an Waldklimastationen (Quelle: Waldzustandsbericht 2004). 

weit durchgeführt. Diese beinhaltete eine Untersuchung des Waldbodens (Humusaufgabe und Mineralboden) und des Ernährungszustandes des Waldes anhand von Blatt- und Nadelproben an ausgewählten Waldstandorten in Form eines nationalen Beprobungsnetzes. In Bayern wurden dabei bisher insgesamt 424 Standorte beprobt. Zusätzlich wurden unter Betreuung der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF) 78 Dauerbeobachtungsflächen eingerichtet, deren Ergebnisse in das Bodeninformationssystem Bayern einfließen (► Modul

F Schadstoffe). Die Ergebnisse der BZE zeigen deutschlandweit eine deutliche Beeinträchtigung der grundlegenden bodenchemischen Regulierungseigenschaften der Waldböden, wie zum Beispiel der Filterfunktion und der Säurepufferkapazität. Nachdem die in den letzten zwanzig Jahren durchgeführten Waldökosystemstudien darüber hinaus den Zusammenhang zwischen dem Zustand des Waldbodens und der Stabilität von Waldökosystemen nachgewiesen haben, ist eine weitere konsequente Reduzierung der Schadstoffemissionen unabdingbar.



4.4 Bodenschutz im Wald

Die Bedeutung des Waldbodens als wertvolle Ressource wurde in der Forstwirtschaft schon frühzeitig erkannt. Waldböden sind nicht nur Produktionskapital, sondern auch Träger vielfältiger Funktionen im Naturhaushalt. Damit liegt ihr Schutz im Interesse des Waldbesitzers, aber auch der Allgemeinheit. Der Schutz des Bodens dient daher als wichtiger Indikator für eine nachhaltige Waldbewirtschaftung. Oberstes Ziel ist dabei die Erhaltung der Funktionsfähigkeit und geschlossener und stabiler Stoffkreisläufe. Dies wird am besten mit naturnah aufgebauten Mischwäldern aus Laub- und Nadelbäumen erreicht. Sie nehmen mit ihren tiefreichenden Wurzeln Nährstoffe aus allen Bodenstockwerken auf. Über den Streufall gelangen so ständig wertvolle Nährstoffe aus dem Unterboden in den Humus, wo sie auf natürliche Weise wieder recycelt werden (↗ Kapitel 3.2). Naturnah Forstwirtschaft mit einem hohen Anteil

an standortgemäßen Baumarten ist der beste Garant für einen effektiven und nachhaltigen Bodenschutz im Wald. Nur bei Böden, die durch jahrhundertelangen Raubbau oder starken Immissionseinfluss geschädigt sind, soll durch eine Waldkalkung die natürliche Selbstregeneration unterstützt werden. Damit der Waldboden seine vielfältigen Funktionen dauerhaft und nachhaltig erfüllen kann, müssen alle Fahrbewegungen streng auf ein Netz von Fahrlinien beschränkt bleiben. Auf diese Weise kann der heute notwendige Maschineneinsatz mit den Zielen des Bodenschutzes in Einklang gebracht werden. Schließlich verzichtet naturnahe Forstwirtschaft auf Dünger und arbeitet nahezu ohne Pflanzenschutzmittel. Da die meisten Nährstoffe in Nadeln und Blättern gespeichert werden, stellt die nachhaltige Nutzung des wertvollen Rohstoffes Holz keine Gefährdung für Waldböden dar. Damit ist die Forstwirtschaft ein gutes Beispiel einer funktionierenden Kreislaufwirtschaft.

C22 | Entwicklung der Nadel- und Blattverluste in Bayern.

Weiterführende Literatur (Auswahl):

Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF) (1995) (Hrsg.): Bodenschutz im Wald – ein forstlicher Beitrag zur Umweltvorsorge. – Broschüre, 35 S., Freising.

Bayerisches Staatsministerium für Landwirtschaft und Forsten (2004): Waldzustandsbericht 2004 (► www.lwf.bayern.de).

Bundesministerium für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft (2005) (Hrsg.): Gesunder Boden – gesunder Wald. Die zweite Bodenzustandserhebung im Wald 2006 – 2008. – Broschüre, 10 S., Bonn.

Hartmann, A. (1997): Verborgene Welt im Kleinen. – In: GSF – Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit (Hrsg.): Böden – verletzliches Fundament. – mensch + umwelt, 11. Ausgabe: S. 50 – 56, Neuherberg.

Mößmer, E.-M. (2001): Gesunde Böden braucht der Wald. – Informationsbroschüre Stiftung Wald in Not, Heft 12, 44 S., Bonn (► www.wald-in-not.de)

Rehfuss, K.E. (1990): Waldböden. Entwicklung, Eigenschaften und Nutzung. – 2. Aufl., Hamburg (Paul Parey-Verlag).

Scheffer, F., Schachtschabel, P. (2002) (Hrsg.): Lehrbuch der Bodenkunde. – 15. Aufl., 528 S., Heidelberg (Spektrum Akademischer Verlag).

Ulrich, B. (1997): Der Boden als Waldstandort. – In: GSF – Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit (Hrsg.): Böden – verletzliches Fundament. – mensch + umwelt, 11. Ausgabe: S. 14 – 22, Neuherberg.

Wolff, B., Riek, W., Hennig, P. (1998): Der Zustand der deutschen Waldböden. – Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft, Forschungsbericht 1998/2.

Herausgeber

Bayerisches Staatsministerium für
Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz (StMUGV)

Staatsinstitut für Schulqualität und Bildungsforschung (ISB)