

Waldböden - Grundlage für die Multifunktionalität von Wäldern

Klaus v. Wilpert

1. EINLEITUNG

An Wälder werden vielfache forstliche und gesellschaftliche Ansprüche gestellt, so z.B. eine in Masse und Qualität nachhaltige Holzproduktion, sie sollen als naturnaher Lebensraum für Pflanzen und Tiere zur Verfügung stehen und darüber hinaus werden sie als wertvoller Erholungsraum, insbesondere in dicht besiedelten Ballungsräumen genutzt. Neben diesen direkt mit dem oberirdischen Erscheinungsbild des Waldes verknüpften Funktionen werden von Wäldern eine Anzahl von Leistungen erwartet, die direkt durch den Boden vermittelt werden. Exemplarisch seien hier genannt die Filterung und Speicherung von eingetragenen Schadstoffen, die Pufferung von Säuren, eine in Qualität und Quantität gleichbleibend hohe Grund- und Trinkwasserspende bis hin zur Funktion von Wäldern und Waldböden als besonders effektive Kohlenstoffspeicher, die der Atmosphäre durch Speicherung von Kohlenstoff CO_2 entziehen.

Sowohl die Existenz des Waldes als Lebens- und Erholungsraum, die Holzproduktion als auch die nicht an die Holzproduktion gebundenen Waldfunktionen sind direkt oder indirekt von den besonderen Eigenschaften der Waldböden abhängig. Waldböden sind eine selbstregulierend gleichbleibende Ernährungsgrundlage für Wälder und Waldvegetation in Bezug auf Nährelement- und Wasserversorgung. Aufgrund der langfristig gleichbleibenden Vegetationsdecke unterliegen die physikalischen und chemischen Rahmenbedingungen für Waldböden und deren Entwicklung geringen Schwankungen. Damit können sich im Boden langfristig stabile Organismenpopulationen aufbauen – Waldböden sind deshalb i.d.R. belebter als Böden in der freien Landschaft. Sie sind makroskopisch in Humusaufgabe und verschiedene, gut unterscheidbare Mineralbodenhorizonte strukturiert und weisen mikroskopisch ein stark differenziertes, hoch kontinuierliches Porensystem auf. Struktur und Belebtheit sind die wesentlichen Grundlagen des Filter- und Speichervermögens von Waldböden für Kohlenstoff, Stickstoff und Schadstoffe. Durch die Lage der Bodenzone zwischen Atmosphäre und Litho-/Hydrosphäre sind sie das „Reaktionsgefäß“, durch das Stofftransporte zwischen diesen Ökosphären stattfinden und in dem Stofftransformationen (z.B. Säurepufferung) möglich sind.

2. HIERARCHITÄT UND STABILITÄT VON WALDÖKO-SYSTEMEN

Die Kompartimente von Waldökosystemen unterliegen einer hierarchischen Ordnung von mikroskopischen, zellulären Strukturen bis hin zur Gesamtheit von Waldökosystemen, die i.d.R. Landschaftsmaßstab einnehmen. Hierbei ist für die Definition von Ökosystemen zu beachten, dass all das zum Ökosystem dazugehört, was unterhalb einer „Input-Grenze“ liegt, über die kein Austrag von Energie und Materie entgegen den Ökosystem typischen Transportgradienten stattfindet und oberhalb einer „Output-Grenze“, für die das gleiche Kriterium auf den Austrag bezogen gilt. Die bei Waldökosystem-Untersuchungen gewählte Betrachtungsebene hängt von der Reichweite der zu untersuchenden Ökosystemprozesse ab. Dabei können auf allen Ebenen Stoffeinträge mit Stoffausträgen verglichen werden und damit anhand der Entwicklung des Stoffvorrats im System (oder Systemausschnitt) eine zeitliche Systementwicklung abgeleitet werden. Für die drei am häufigsten in der Ökosystemforschung realisierten Betrachtungsebenen soll der Zusammenhang zwischen auf das Ökosystem oder dessen Ausschnitte einwirkenden Störpulsen und den entsprechenden Systemreaktionen erläutert werden (Abb. 1).

Das repräsentative Bodenvolumen (RBV) ist der kleinste Bodenausschnitt, in dem die für wesentliche Bodeneigenschaften verantwortlichen Anteile an Bodenfestsubstanz, belüfteten und wassererfüllten Poren in repräsentativen Anteilen enthalten sind (*GISI* 1990). Dieser Bodenausschnitt mit einer Größe im Deziliterbereich und einer typischen Oberfläche im Bereich weniger Quadratzentimeter ist die Grundlage von Modellversuchen im Labor unter weitgehend kontrollierbaren Randbedingungen. Der einwirkende Störimpuls (z.B. Säureeintrag im Labormodellversuch) ist in

Abb. 1 anhand des physikalischen Analogiebeispiels eines Hammerschlags auf ein Pendel dargestellt. Die einwirkende Kraft ist proportional zur Oberfläche des Pendels (analog zur Deposition, die proportional zur Bodenoberfläche ist und nicht zum Bodenvolumen). Sie ist so intensiv, dass die kleine Masse des dem repräsentativen Bodenvolumen entsprechenden Pendels chaotisch ausgelenkt wird, sich überschlägt und damit in nicht prognostizierbarer Weise auf den Störpuls reagiert. Im oben erwähnten Anwendungsbeispiel kann man sich vorstellen, dass die im Modellversuch untersuchte Bodenprobe aus einem Oberboden stammt, in dem schon weitgehend alle Pufferkapazität erschöpft ist. Damit führt der Säureeintrag im Experiment schnell zu vehementen Systemreaktionen, was die Möglichkeit beinhaltet, Funktionsstörungen frühzeitiger zu erkennen, als sie auf größerskaligen Ökosystemebenen erkennbar werden.

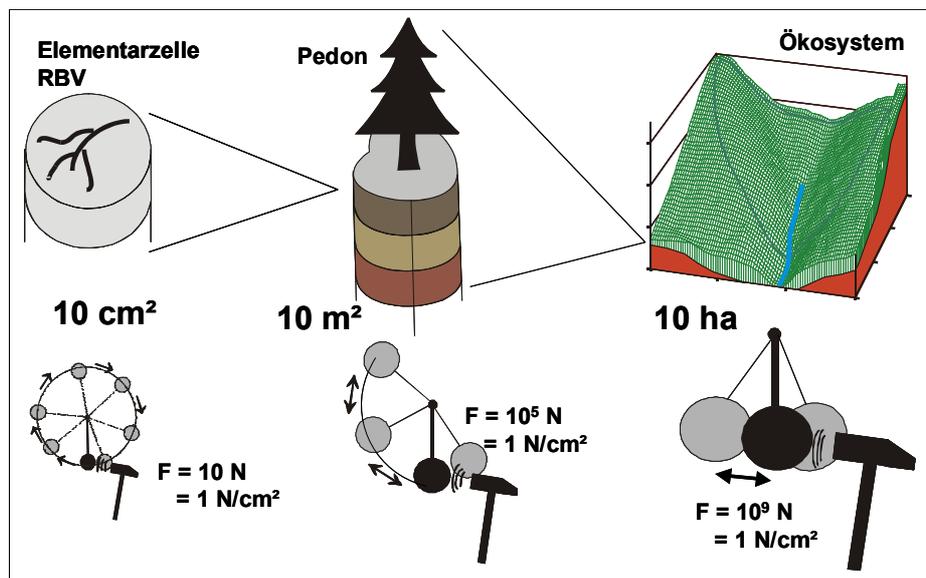


Abb.1: Schema der Sensitivität von Waldökosystemen oder Systemausschnitten gegenüber Störungen in Abhängigkeit von deren Größe.

Der dem Stand- und Wurzelraum von ausgewachsenen Waldbäumen entsprechende Bodenausschnitt ist das Pedon mit einem typischen Volumen

von mehreren Kubikmetern und einer Oberfläche im Bereich von 10 bis 100 m². Das Pedon ist eine häufige Bezugsebene der Waldökosystemforschung, insbesondere in Einzelbaum bezogenen Experimenten wie z.B.

Dachexperimenten. Im physikalischen Analogbeispiel (Abb. 1) wird die Masse des Pendels proportional zum Volumen des Pedons gewählt und die Intensität der einwirkenden Kraft wiederum proportional zur Oberfläche des Systemausschnitts. Da die Masse des Pendels gegenüber dessen Oberfläche um eine Potenz schneller wächst, ist die Auslenkung hier zwar noch stark, aber nicht mehr chaotisch, und nach mehreren heftigen Ausschlägen befindet sich das Pendel wieder in seinem „systemtypischen Attraktorbereich“, es hängt nach unten. In der Realität der Ökosystemforschung kann man sich vorstellen, dass in einem Einzelbaum bezogenen Dachexperiment mit saurer Beregnung im Unterboden des Pedons noch ausreichend Pufferreserven vorhanden sind, um während der Laufzeit des Versuches alle Säureeinträge abzupuffern.

Die Betrachtungsebene gesamter Waldökosysteme wird in Abb. 1 anhand eines bewaldeten Wassereinzugsgebietes veranschaulicht. Hierbei gehen alle Fließwege des Bodenwassers, die zur Zusammensetzung des Gebietsabflusses beitragen in die Betrachtung ein (die im Blockbild grün gezeichneten Bereiche innerhalb der hydrologisch definierten Wasserscheiden). Auf Ökosystemebene wirken qualitativ unterschiedliche Prozesse in Richtung Dämpfung von Systemstörungen. Am Beispiel der Auswirkung von Säureeinträgen sind Pufferreserven im Gestein des Aquifers, unterschiedliche Waldbestände mit unterschiedlicher Auskämmung für Depositionen etc. zu berücksichtigen. Außerdem wird die Erkennbarkeit von Ökosystemstörungen dadurch erschwert, dass viele Prozesse (z.B. Säurepufferung) lange Zeit verdeckt ablaufen und leicht erkennbare Zustandsänderungen (z.B. Änderung des pH-Werts im System –

Output nach Aufbrauchen der Pufferkapazität) schwellenartig auftreten. Durch die Größe und Prozessvielfalt im System ist die Neigung nach Störeinwirkungen sich schnell wieder in einem Bereich chemisch, physikalisch und biologisch günstiger Bedingungen einzupendeln hoch. Auf dieser Eigenschaft beruht das Vertrauen der Praxis, dass Wälder sich prognostizierbar verhalten und dass sie über einfache betriebliche Maßnahmen steuerbar sind (*HAUHS* 1991). Dieses „Attraktorverhalten“ ist wiederum durch das Beispiel eines entsprechend der Systemgröße nun sehr viel trägeren Pendels symbolisiert, auf das wiederum ein in der Intensität oberflächenproportionaler Störimpuls wirkt. Dabei wird das Pendel nur sehr wenig ausgelenkt und schwenkt sehr schnell wieder in die Ruhelage zurück. Aus dem dargestellten Schema lässt sich ableiten, dass Waldökosysteme im natürlichen Zustand zur Stabilität tendieren, da sie über charakteristische Filtermechanismen verfügen, und so die Variabilität und Intensität der auf kleinskaligen Hierarchieebenen ablaufenden Prozesse in Richtung großräumiger Veränderungen dämpfen (*ULRICH* 1994, 1999). Es hängt von der Fragestellung von Ökosystemuntersuchungen ab, auf welcher Maßstabsebene diese durchgeführt werden müssen. So lassen sich z.B. chemische Austauschgleichgewichte am besten an Bodenausschnitten in der Größenordnung des repräsentativen Bodenvolumens im Labor untersuchen, während z.B. baumphysiologische Reaktionen auf Versorgungsengpässe im Boden oder ähnliche prozessorientierte Studien typischerweise im Maßstab des Pedons erfolgen. Eine Prognose von Ökosystementwicklungen und davon ausgehenden Wirkungen für nachgeschaltete Ökosphären, wie z.B. die Verschlechterung der Grund- und Trinkwasserqualität durch zunehmende Stickstoffsättigung und Bodenversauerung lässt sich nur auf Ökosystemebene unter Einschluss der wesentlichen Ökosystemprozesse

durchführen (*HILDEBRAND & HOCHSTEIN 1993, HILDEBRAND et al. 1996, v. WILPERT 1999*).

3. BÖDEN ALS SCHNITTSTELLE ZWISCHEN DEN ÖKO-SPHÄREN

In Böden durchmischen sich in idealer, strukturierter Weise die Atmosphäre, feste Gesteins- und Bodensubstanz und die Bodenlösung. Sie stellen damit das ideale Habitat und die Lebensgrundlage für Bodenorganismen und Pflanzenwurzeln dar. Böden sind jedoch nicht nur die Ernährungs- und Lebensgrundlage für Pflanzen und Bodenorganismen, sondern sie sind der Reaktionsraum, in dem Stoff- und Energieflüsse von der Atmosphäre, durch die Pedosphäre hindurch in Richtung Hydrosphäre, aber auch aus der Pedosphäre in Richtung Atmosphäre (gasförmige Komponenten) vermittelt und modifiziert werden. Schädliche Stoffeinträge wie Säure- und Stickstoffeinträge werden gepuffert oder bis zur natürlichen Kapazitätsgrenze zwischengespeichert.

Böden unterscheiden sich von Sedimenten (z.B. einem unbelebten Sand) dadurch, dass sie gegenüber der durch Korngröße der Mineralbestandteile und Scherkräfte zwischen diesen vorgegebenen Porenstrukturen durch eine Kombination von charakteristischen Bodenbildungsprozessen und einem ständigen Energie- und Materieeintrag aus biologischen Prozessen eine sekundäre Aggregatstruktur entwickeln, welche die besonderen funktionellen Eigenschaften von Böden möglich macht.

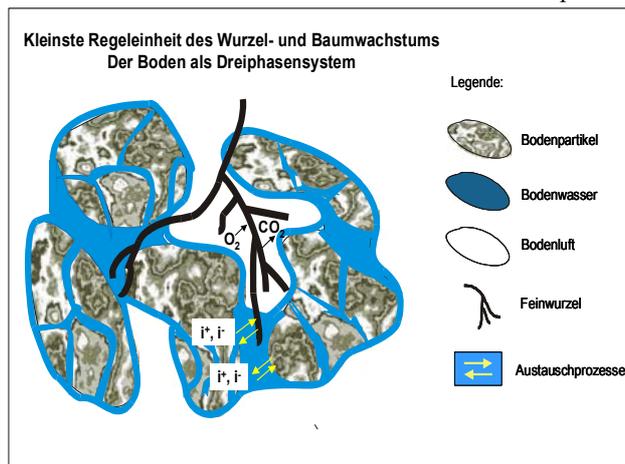
In unseren Breiten herrschen die Verbraunung und Verlehmung als Bodenbildungsprozess vor, deren Ergebnis die hochgeordneten Strukturen von Tonmineralen sind. Durch die Einarbeitung organischer Substanz durch Bodenlebewesen werden diese zu Ton-Humuskomplexen verarbeitet und durch die Arbeitsleistung der „Bioturbation“ ständig in einem hoch gelockerten Zustand gehalten. Das Ergebnis ist eine Bodenstruktur, die auf kleinstem Raum die Versorgung von Organismen mit Wasser und gelösten Nährelementen sowie die Versorgung mit Sauerstoff und Entsorgung des bei Atmungsprozessen entstehenden CO₂ ermöglicht.

Die Ionen- und Nährelementkonzentrationen in der Bodenlösung, aus der Baumwurzeln Nährelemente aufnehmen, stehen im chemischen Gleichgewicht mit den austauschbaren Ionenvorräten der Bodenfestphase. Letztere werden wiederum langfristig aus der Verwitterung primärer Silikate gespeist. Außerdem stellt die Festsubstanz des Bodens eine geeignete Gerüststruktur für die Verankerung von Baumwurzeln dar (Abb. 2).

4. SELBSTREGULATIONSVERMÖGEN IM WASSERHAUSHALT

Die biologische Entstehung des sekundären Porensystems im Boden führt dazu, dass

dieses einerseits hoch kontinuierliche, durchlässige Grobporen ausweist, und damit eine hohe Transportleistung für Bodenwasser und Luft ermöglicht und andererseits durch eine differenzierte hierarchische Gliederung von Porengrößenklassen ein enges Nebeneinander zwischen Arealen mit hohem Grobporenanteil zwischen Bodenaggregaten und Arealen mit relativ feinen Poren innerhalb der Aggregate entsteht. Dadurch stellen gut aggregierte Waldböden bezüglich des Wasserhaushalts ein negativ rückgekoppeltes, selbstregulierendes System dar, das die Wassersättigung in einem für das Pflanzenwachstum und andere Bodenfunktionen optimalen Bereich hält. Dies führt unter anderem dazu, dass aus zeitlich/räumlich hochvariablen Niederschlägen ein weitgehend gleichmäßiger Gebietsabfluss in bewaldeten Wassereinzugsgebieten entstehen kann sowie, dass die Versorgung von Pflanzen mit Wasser gleichmäßig garantiert ist.



anderem dazu, dass aus zeitlich/räumlich hochvariablen Niederschlägen ein weitgehend gleichmäßiger Gebietsabfluss in bewaldeten Wassereinzugsgebieten entstehen kann sowie, dass die Versorgung von Pflanzen mit Wasser gleichmäßig garantiert ist.

Abb. 2: Struktur des repräsentativen

Bodenvolumens (nach HILDEBRAND (1994), verändert).

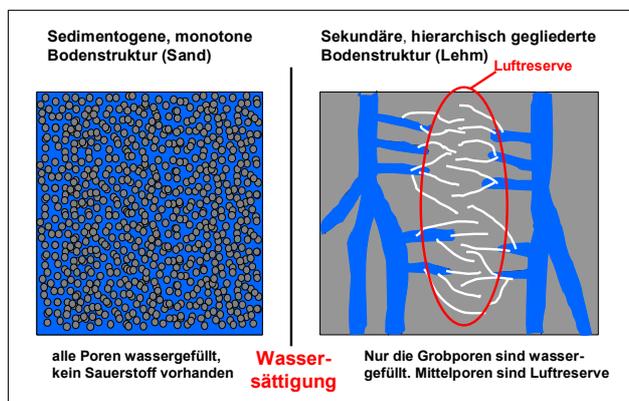
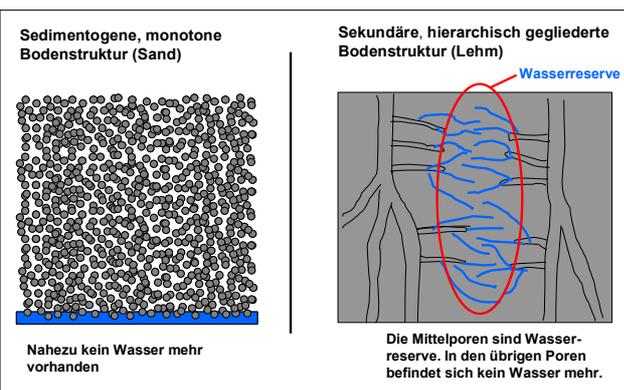


Abb. 3: Schematischer Vergleich des Wasser- und Lufthaushalts in der sedimentogenen, monotonen Porenstruktur eines Sandes und der hierarchisch gegliederten Porenstruktur eines gut aggregierten Lehms im Stadium der Wassersättigung (oben) und Austrocknung (unten).



Am Beispiel eines Sandes mit Einzelkorngefüge und ohne eine erkennbare biogene Aggregatstruktur im Vergleich mit einem gut strukturierten Lehm, der ein hierarchisch gegliedertes Sekundärporensystem aufweist, wird dieses Selbstregulationsvermögen schematisch

demonstriert (Abb. 3). In Phasen der Wassersättigung wird das monotone, grobe Porensystem des Sandes sehr schnell mit Wasser gefüllt. Bei längerer Dauer dieses Zustandes entstehen Engpässe in der Luftversorgung von Wurzeln, während im vergleichbaren Sättigungszustand im hierarchisch gegliederten Porensystem des Lehms nur die Grobporen wassergefüllt sind, im Mittelporenbereich sind dort noch Luftreserven eingeschlossen (Abb. 3 oben). In Trockenphasen wird der Sand sehr schnell nahezu vollständig austrocknen, während im Mittelporenbereich des Lehms der Wasserabfluss verzögert ist und damit über längere Zeit eine, wenn auch leicht erschwerte, pflanzenverfügbare Wasserreserve bestehen bleibt (Abb. 3 unten). Die verzögerte Entleerung des Mittelporenbereiches erklärt sich dadurch, dass „die hydraulische Leitfähigkeit mit zunehmender Wasserspannung schwellenartig wegbriecht“ (HILDEBRAND 1999).

Dieses stark abstrahierte Fallbeispiel soll zeigen, dass belebte Waldböden mit einer hierarchisch gegliederten sekundären Bodenstruktur die günstigsten Voraussetzungen für eine gleichmäßige Wasserversorgung von Wäldern und Waldvegetation bieten.

5. RAHMENBEDINGUNGEN FÜR TYPISCHE BODENPROZESSE

Die dargestellte Funktionalität von Waldböden ist jedoch nur unter definierten Rahmenbedingungen möglich. Diese betreffen sowohl die chemischen Prozesse der Verwitterung primärer Silikate (Aufbereitung von Ausgangsmaterialien der Bodenbildung), die Tonmineralneubildung, Lebensmöglichkeiten von Bodenorganismen, die Humifizierung und dadurch die langfristige stabile Kohlenstoffspeicherung in Form von Mineralbodenhumus, sowie die Stabilität des Bodengefüges (Abb. 4).

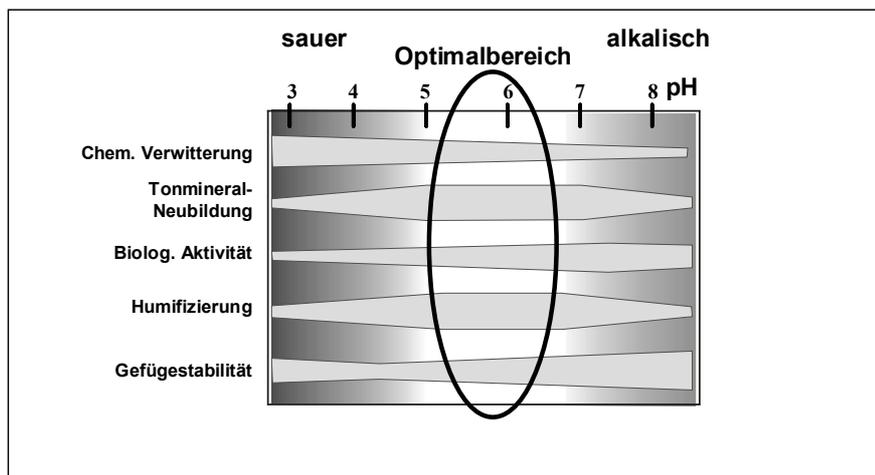


Abb. 4: Schema der Intensität wichtiger pedogenetischer und bodenökologischer Prozesse in Abhängigkeit vom pH-Wert in der in Böden normalerweise vorkommenden pH-Spanne (nach *SCHRÖDER* 1992, verändert).

Die Darstellung zeigt, dass die drei Struktur schaffenden Prozesse Tonmineralneubildung, Humifizierung und die biologische Aktivität ihr Optimum im mittleren pH-Bereich zwischen den pH-Werten 5 und 6 aufweisen. Die chemische Verwitterung, welche die Ausgangsmaterialien für den Aufbau neuer strukturreicher Tonminerale aus gesteinsbürtigen Silikaten freisetzt, ist zwar bei niedrigen pH-Werten maximal, was aber nicht zum verstärkten Aufbau von stabilen Ton-Humuskomplexen führt, da Tonminerale in diesem Bereich (um pH 3) nicht mehr stabil sind und die biologische Aktivität, die Grundlage der Bildung von Mineralbodenhumus minimal. Der einzige gegenläufige Prozess ist die Gefügestabilität, die im Bereich der für Struktur schaffende Prozesse günstigen pH-Werte um 5 ein Minimum aufweist. Dies ist dadurch erklärlich, dass im alkalischen Bereich die dort vorherrschenden Calcium-Ionen durch ihre Flockungseigenschaften Gefüge stabilisierend wirken, im sauren Bereich stabilisieren die noch stärker flockenden Aluminium - Ionen das Gefüge. Im Übergangsbereich stehen Ca^{2+} nicht mehr und Al^{3+} noch nicht in ausreichender Intensität zur Verfügung, um vorhandene Bodenstrukturen gegenüber Gefüge abbauenden äußeren Einflüssen zu konservieren. Böden in diesem Übergangsstadium sind zur Erhaltung eines leistungsfähigen Porensystems in besonderem Maß auf die ständig neuen Porenraum schaffende Aktivität von Bodenorganismen angewiesen.

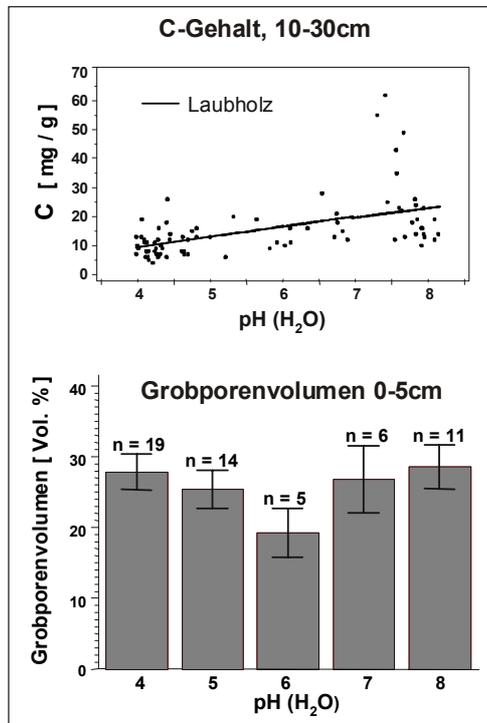


Abb. 5: Aspekte der Strukturgenese und -erhaltung an Lehmstandorten der Laubholz-BZE. Organischer Kohlenstoffgehalt (oben) und Grobporenvolumen (unten) in Abhängigkeit vom pH-Wert.

Dass die in Abb. 4 dargestellten Relationen im Wesentlichen auch unter den aktuellen Rahmenbedingungen noch wirksam sind, lässt sich am Material von Umweltüberwachungsmessnetzen wie der Laubholz-BZE zeigen. Die Darstellung wurde auf die Laubholz-BZE beschränkt, da hier die größte pH-Spanne vorliegt und außerdem neben den bodenchemischen auch bodenphysikalische Daten verfügbar sind. In Abb. 5 ist für Lehmstandorte der organische Kohlenstoffgehalt im Hauptwurzelraum (10 – 30 cm) als

Resultierende der biologischen Aktivität dargestellt. Der organische C-Gehalt nimmt im Mittel innerhalb der pH-Spanne von pH 4 – 8 von Werten um 10 mg/g auf ca. das Doppelte zu. Das bedeutet, dass in Böden mit höheren pH-Werten sowohl bezüglich der physikalischen Bodenstruktur als auch des Speichervermögens für Kohlenstoff und auch Stickstoff günstigere Eigenschaften zu erwarten sind.

Im unteren Teil der Abb. 5 ist die Abhängigkeit des Grobporenvolumens vom pH-Wert an der Mineralbodenoberfläche der gleichen Standorte dargestellt. Hier wird die in Abb. 4 postulierte Strukturschwäche im Bereich von pH 6 erkennbar. Es ist jedoch zu beachten, dass die hohen Grobporenvolumina bei niedrigen pH-Werten nicht unbedingt auch Porensysteme mit hoher Durchlässigkeit für Wasser und Bodenluft bedeuten müssen, da es sich dabei z.B. auch um durch Inkrustierung von Aluminiumhydroxid „fossilisierte“, wenig kontinuierliche Poren handeln kann. Bei vordergründiger Betrachtung könnte die Strukturschwäche bei pH 6 in Zusammenhang mit Kalkungen problematisiert werden. Die Erfahrung bei der Waldkalkung zeigt jedoch, dass eine Anhebung des pH-Wertes auf maximal 5 und damit innerhalb der in Waldböden typischerweise leicht sauren Bodenreaktion realistisch möglich ist. Eine darüber hinausgehende Anhebung der Bodenreaktion ist nicht Ziel und Gegenstand von Bodenschutzkalkungen.

6. GEFÄHRDUNG DER BODENFUNKTIONEN – SCHLUSSFOLGERUNGEN FÜR DIE PRAXIS

Aktuell sind die nachhaltige Standortsqualität, Filter- und Pufferfunktionen von Böden sowie deren Eignung als Lebensraum artenreicher Bodenorganismen – Populationen durch Bodenversauerung, die hauptsächlich durch Säure- und Stickstoffeinträge aus der Luft angetrieben wird, akut gefährdet.

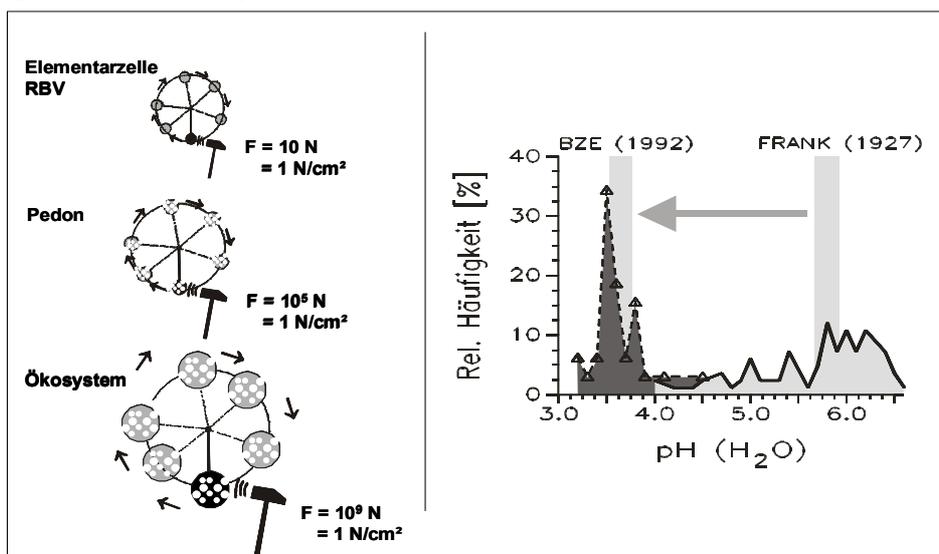


Abb. 6: Absenkung des pH-Wertes in Oberböden auf Buntsandstein zwischen 1927 und 1992 (rechts) und die schematische Darstellung der Auswirkung dieser chronischen „Systemerosion“ auf die Sensitivität von Ökosystemen und Subsystemen gegenüber Störimpulsen (links)

Auf silikatischen und tief entkalkten Böden im Bereich von Schwarzwald und Odenwald hat die Säurestärke im Oberboden um 1,5 – 2 pH-Stufen zwischen Mitte der 20er und Anfang der 90er Jahre zugenommen (v. *WILPERT & HILDEBRAND* 1994). In Abb. 6 ist diese Entwicklung am Beispiel der pH – Veränderung in Oberböden auf Bunsandsteinstandorten gezeigt. Durch diese anthropogen verursachte Bodenversauerung werden Intensität und Relation pedogenetischer und bodenökologischer Leitprozesse teilweise schwellenartig verschoben (s. Abb. 4). Durch die enge Prozesskoppelung zwischen bodenchemischen, bodenphysikalischen und bodenbiologischen Eigenschaften von Böden bewirkt eine solch drastische Verschlechterung des bodenchemischen Milieus in für die natürliche Bodenentwicklung extrem kurzer Zeit als integrale Beeinträchtigung von Filter- und Puffereigenschaften sowie der Lebensraumfunktion von Böden. In Rückblende zu unserem physikalischen Gedankenmodell von Abb. 1 ist dieser Aspekt in Abb.6 (links) schematisiert. Auf der Ebene des repräsentativen Bodenvolumens (RBV) besteht ähnliche Unsicherheit in der Prognose von System - Entwicklungen wie im ungestörten Zustand. Auf der mesoskaligen Ebene des Pedons wird durch diese „Erosion wesentlicher Systemeigenschaften“ (z.B. Aufbrauchen von Puffersubstanzen und deren Wegfuhr mit dem Bodenwasser in Form von Neutralsalzen) eine ähnliche Sensitivität wie auf der Mikroebene verursacht. Im Analogbeispiel ist dies durch die „Perforation“ des Pendels symbolisiert. Dadurch wird die Masse des Pendels reduziert, bis sie sich im Extremfall proportional zur äußeren Oberfläche verhält. Letzteres würde gleichbedeutend mit dem vollständigen Verlust der systemaren Regeleigenschaften sein. Das Pendel wird nach der Krafteinwirkung ähnlich chaotisch und nicht prognostizierbar ausschlagen wie auf der Ebene des RBV. Auf Ökosystemebene gilt das Gleiche. Ein Verlust von Regeleigenschaften auf Ökosystemebene würde sich in der Realität z.B. darin äußern, dass der Systemoutput (z.B. Menge und chemische Zusammensetzung des Gebietsabflusses) nicht mehr gedämpft und gleichmäßig ist, sondern in Abhängigkeit von der Variabilität des Inputs (z.B. des Niederschlags) schwankt. Das bedeutet, das System puffert nicht mehr.

Wenn in Waldböden der Optimalbereich des pH-Wertes z.B. durch Säureeinträge in Richtung Bodenversauerung eindeutig verlassen wird,

werden die dargestellten Bodenfunktionen drastisch eingeschränkt oder in den betroffenen Bodenpartien vollständig zerstört. Letztendlich bleibt ein Restboden übrig, der im wesentlichen nur noch ein mechanisches Stützkorsett z.B. für Pflanzenwurzeln darstellt und seine Filtereigenschaften und Pufferkapazitäten sowie die Eigenschaft als Lebensraum weitgehend eingebüßt hat.

In der Verantwortung für ca. 1/3 der Landesfläche muss die Forstverwaltung mit allen Mitteln steuernd eingreifen um essentielle Waldbodenfunktionen zu sichern, bis die politische Umsetzung von Luftreinhaltemaßnahmen Säure- und Stickstoffeinträge auf ein ökosystemverträgliches Maß reduziert haben wird. Bodenschutzkalkungen sind eine effektive, biologisch, chemisch und physikalisch wirksame Stabilisierungsmaßnahme. Deren langfristige Wirkung muss durch eine waldbauliche Umorientierung in Richtung verstärkten Laubholzanbaus stabilisiert werden (v. *WILPERT* et al. 2000). Es ist klar, dass mit diesen forstbetrieblichen Maßnahmen nur Zeit gewonnen werden kann, bis eine auf langfristigen Boden- und Ökosystemschutz ausgerichtete Umweltpolitik greifen wird.

LITERATUR

GISI, U.; SCHENKER, R.; SCHULIN, R.; STADELMANN, F.X.; STICHER, H. (1990): Bodenökologie, Thieme Stuttgart, 304 S.

HAUHS, M. (1991): A Definition of Ecosystems Based on Information Theory. In: FRANKE, J.; ROEDER, A. (eds.) Mathematical Modelling of Forest Ecosystems, Sauerländer Frankfurt, 83 – 91

HILDEBRAND, E.E.; HOCHSTEIN, E. (1993): Wie kann man Gesundheit oder Krankheit von Wäldern messen? Biologie in unserer Zeit, 23 / 3, 170 – 177

HILDEBRAND, E.E. (1994): Der Waldboden – ein konstanter Produktionsfaktor? Allg. Forst Ztg. 2, 99 – 104

HILDEBRAND, E.E.; v. WILPERT, K.; BUBERL, H.G. (1996): Erkenntnismöglichkeiten an Waldökosystemen im Spannungsfeld zwischen großräumiger Mustererkennung und dem „Eisernen Gesetz des Örtlichen“. Allg. Forst und Jagdz. 167, 174 – 178

HILDEBRAND, E.E. (1999): Vom Punkt zur Fläche – Neue Wege. In: SCHÄFFER et al. (Hrsg.) Stoffhaushalt von Waldökosystemen, 1 – 6

SCHRÖDER, D. (1992): Bodenkunde in Stichworten, Hirt Berlin Stuttgart, 175 S.

ULRICH, B. (1994): Process hierarchy in forest ecosystems – an integrating ecosystem theory. In: GODBOLD, D.L.; HÜTTERMANN, A. (eds.) Effects of Acid Rain on Forest Processes. Wiley – Liss New York, 353 – 397

ULRICH, B. (1999): Entwicklungsprognosen für Waldökosysteme aus der Sicht der Hierarchietheorie. Forstw. Cbl. 118, 118 – 126

v. WILPERT, K.; HILDEBRAND, E.E. (1994): Stoffeintrag und Waldernährung in Fichtenbeständen Baden-Württembergs. Forst und Holz, 49, 629 – 632

v. WILPERT, K. (1999): Chemische Trends in Waldböden. In: SCHÄFFER et al. (Hrsg.) Stoffhaushalt von Waldökosystemen, 105 – 108

v. WILPERT, K.; ZIRLEWAGEN, D.; KOHLER, M. (2000): To what extent can silviculture enhance sustainability of forest sites under the immission regime in Central Europe? Water Air and Soil Pollution, 122, 1/2, 105 – 120