

## Kalkung und Bodenleben

### Kirsten Stöven und Ewald Schnug

Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde, Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL), Bundesallee 50, D-38116 Braunschweig

#### Zusammenfassung

Eine Bodenkalkung hat durch die Veränderung des pH-Wertes im Boden und die Stabilisierung der Bodenstruktur eine Wirkung auf die Organismen, die im Boden leben. Die veränderten Lebensbedingungen wirken in Kombination mit anderen Faktoren, die das Bodenleben beeinflussen. Neben dem pH-Wert wirkt die Bodenfeuchte stimulierend bzw. limitierend auf viele Bodenorganismen. So kann beispielsweise der pH-Wert des Bodens für eine Art optimal sein, aber die mangelnde Bodenfeuchte macht die Existenz dieser Organismen unmöglich.

Auf Artenebene verschiebt sich prinzipiell nach Bodenkalkungen das Artengefüge aller Bodenorganismen in Richtung neutrophiler oder alkalitoleranter Arten. Dies ist umso auffälliger, je saurer der Boden vor der Kalkung war. Ein infolge einer Bodenkalkung stabileres Hohlraumssystem kann die Abundanzen insbesondere der größeren Bodentiere erhöhen, die in den luftgefüllten Kammern des Bodens leben und nicht graben können.

Schlüsselwörter: *Bodenleben, Bodenorganismen, Kalkung, pH-Wert*

#### Summary

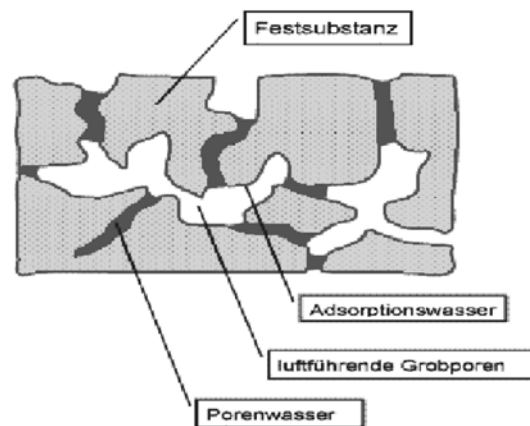
Soil liming affects soil organisms by changing soil pH and stabilizing soil structure. The changed living conditions become effective in combination with other factors, which control soil life. Beside the pH value, the soil moisture content is stimulating or limiting the life of soil organisms. The pH value of a soil might be ideal for one species, while the lack of soil moisture simply eliminates the existence of that organisms. At species level, the community is shifted towards pH-neutral or alkaline tolerant species by liming. This influence is more distinctive if the soil was extremely acid before liming. Following a soil liming treatment more stable pores in the soil favor the abundance, especially of larger soil animals, which are existing in the air-filled pores and which are unable to burrow.

Keywords: *liming, pH value, soil life, soil organisms*

#### Einleitung

Mit dem Begriff Bodenleben wird die Gesamtheit der zwischen Erdoberfläche und tieferliegendem Gestein lebenden Organismen bezeichnet, synonym werden auch die Bezeichnungen Edaphon und Bodenbiozönose verwendet (Gisi, 1990; Topp, 1981).

Zum Bodenleben zählen Tiere (Bodenfauna) und Bakterien, Algen sowie Pilze (Bodenflora). Auch unterirdische Pflanzenorgane bzw. -teile wie Wurzeln, Knollen, Zwiebeln und Stolonen gehören zum Bodenleben. Das Leben in der Bodenzone ist ein noch recht wenig erforschtes Gebiet, so dass Durner (2002) den Lebensraum Boden als „Terra incognita“ bezeichnet. Der Lebensraum der Bodenorganismen ist das Hohlraumssystem zwischen den mineralischen und organischen Bodenteilchen (Abb. 1) oder in der Streuschicht (pflanzlicher Bestandsabfall). Die Bodenorganismen erzeugen durch Graben und Fressen der Bodenpartikel, Pflanzen durch das Wachstum von Wurzeln und Wurzelhaaren, ständig neue Hohlräume und Poren. Die ökologische Funktion der Bodenorganismen ist der Abbau der Streu bis hin zu anorganischen Molekülen, die den Pflanzen zum Aufbau neuer Biomasse dienen. Der Boden befindet sich im Idealfall in einem Fließgleichgewicht (Gisi, 1990). Nach dem Abfallen des Blattes vom Baum z.B. werden zunächst leicht lösliche Bestandteile der Biomasse wie z.B. Zucker, Aminosäuren etc. ausgewaschen, was zu einer Anreicherung von Bakterien und Pilzen im Boden führt. Im nächsten Schritt werden die Blätter von den Primärzersettern unter den Bodentieren durch Zerbeißen zerkleinert, dabei werden Zellstrukturen zerstört und die Zellfragmente und -inhalte für andere Bodenorganismen zugänglich gemacht (Anderson & Ineson, 1984). Mit dem Kot der Primärzersetzer werden die nur wenig verdauten Pflanzenteile wieder freigesetzt. Dieser dient wiederum Sekundärzersettern als Nahrung. Auf dem Kot der Primär- und Sekundärzersetzer siedeln Mikroorganismen an, die das Material in seine chemischen Bausteine zerlegen. Der Bakterien- und Pilzrasen wird von weiteren Sekundärzsetzern beweidet. Ohne diese Beweidung käme der Abbau des Materials zum Erliegen, da die Mikroorganismen sich nicht mehr vermehren würden (Gisi, 1990).



**Abb. 1:** Schematische Darstellung des Bodens als Hohlräumensystem (Staatliche Lehr- u. Versuchsanstalt für Wein- u. Obstbau Weinsberg)

Auf die Bodenorganismen wirken eine Vielzahl von physikalischen, chemischen, biologischen und anthropogenen Faktoren ein (Abb. 2), die die Zusammensetzung der biologischen Lebensgemeinschaft im Boden verändern und das Fließgleichgewicht des Auf- und Abbaus pflanzlicher Biomasse stören können.

Mit jedem Eingriff in den Boden, z.B. bei Bodenbearbeitung, Düngung oder Pestizideinsatz, werden die Lebensbedingungen zumindest für einen Teil der Bodenorganismen tiefgreifend verändert. Diese Arbeit beschäftigt sich mit den Auswirkungen der Bodenkalkung auf das Bodenleben. Bodenkalkungen werden zur Regulierung des pH-Wertes im Boden, zur Verbesserung der Nährstoffversorgung von Pflanzen durchgeführt. Die Beurteilung der Auswirkungen von Eingriffen in den Boden bzw. die Charakterisierung von Standorten kann anhand der am Standort leben-

den Bodenorganismen erfolgen. Dazu werden quantitativ und qualitativ erfassbare Daten gesammelt (Römbke et al., 1997) und Standorte mittels dieser verglichen oder Veränderungen nach Eingriffen in das Ökosystem ermittelt. Dunger (1978) schlägt u.a. die Erfassung von Artenzahl, Abundanz (Individuenzahl pro Flächen-, Volumen- oder Gewichtseinheit), Reproduktion (z.B. Eizahl, Teilungsrate) oder Biomasse vor. Die Direktwägung der Individuen der Bodenbiozönose ist jedoch praktisch nur beim Regenwurm möglich, daher beruhen die Biomasseangaben in der Literatur für alle anderen Bodenorganismen auf Schätzungen, die anhand von Multiplikation des Durchschnittsgewichtes der Individuen einer Art mit der Abundanz errechnet werden (Römbke et al., 2002).



**Abb. 2:** Faktoren, die das Leben der Bodenorganismen beeinflussen

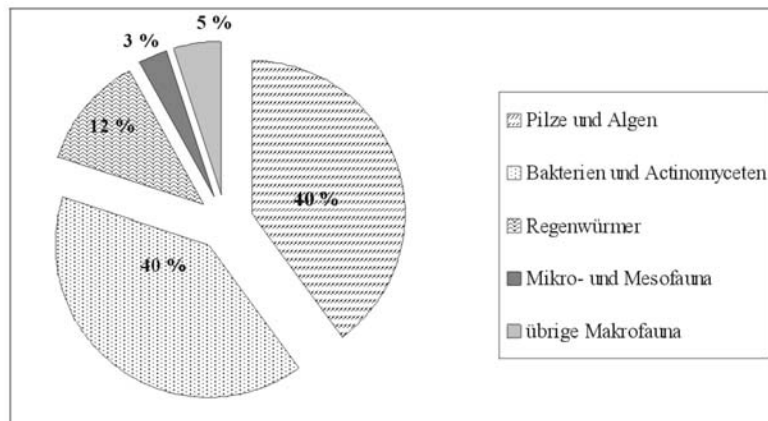


Abb. 3: Mittlere Zusammensetzung bezogen auf das Trockengewicht (Topp, 1981)

Die Biomasse ist wiederum eine Bezugsgröße für Funktionsparameter wie beispielsweise Respiration (Aufnahme von Sauerstoff), Streuabbau (Gewichtsabnahme von Laub im Netzbeutel) oder Verhaltensäußerungen von Bodenorganismen (z. B. Grabaktivität von Regenwürmern). Die Mitglieder der Bodenbiozönose werden anhand ihrer Körpergröße verschiedenen Größenklassen zugeordnet (Tab. 1; Gisi, 1990). Die Organismen mit der geringsten Körpergröße sind im Boden mit den höchsten Individuenzahlen vertreten. Abb. 3 zeigt die Zusammensetzung der Biozönose im Boden.

*Auswirkungen der Bodenkalkung auf ausgewählte Bodenorganismen*

Im Folgenden werden die Reaktionen ausgewählter Bodenorganismen auf die Bodenkalkung beschrieben.

Tab. 1: Klassifizierung der Bodenorganismen nach Größenklassen basierend auf Individuengrößen und Vertreter der Größenklassen (Gisi, 1990; Topp, 1981)

Größenklasse	Individuengröße	Organismen
Megafauna	>2cm	große Regenwürmer
Makrofauna	2mm – 2cm	Schnecken, kl. Regenwürmer, Asseln, Doppelfüßler
		Milben, Fadenwürmer, Enchytraeiden, Springschwänze, Rädertiere
Mesofauna	0,2 – 2mm	Protozoen
Mikrofauna	20 - 200µm	Algen, Pilze, Bakterien

*Megafauna*

Zur Megafauna zählen Regenwürmer und Wirbeltiere. Da Wirbeltiere wie Maulwurf und Spitzmaus jedoch nur in außerordentlich geringer Individuenzahl pro Flächeneinheit (i.d.R. ein Quadratmeter) verglichen mit den Individuenzahlen der anderen Vertreter des Edaphons auftreten, werden sie nicht berücksichtigt (Topp, 1981). Regenwürmer (Lumbriciden) sind an den meisten Standorten die für das Bodenökosystem wichtigsten Bodenorganismen (Römbke et al., 2002), deren Bedeutung für die Bodenfruchtbarkeit bereits Darwin (1904) bekannt war. Die Lumbriciden bewegen sich bohrend und fressend durch den Boden und hinterlassen bis zu 5 mm dicke Röhren (Bioporen), die für die Durchlüftung des Bodens wichtig sind (Gisi, 1990). Sie nehmen an der Oberfläche große Mengen Streu auf, die sich im Darm der Tiere mit den ebenfalls aufgenommenen mineralischen Bodenpartikeln vermischt. Die auf der Streuoberfläche befindlichen Bakterien werden während der Darmassage nicht abgetötet und tragen zur Zersetzung der pflanzlichen Substanz bei. Im Darm des Wurmes werden die zunächst unverdaulichen organischen und anorganischen Bestandteile durch Darmsekrete miteinander verkittet, dadurch werden feste organo-mineralische Verbindungen, bzw. Ton-Humus-Komplexe gebildet (Topp, 1981). Durch das Absetzen der Kothaufen an anderer Stelle als die Nahrungsaufnahme, erfolgt die Einmischung der Streu in den Boden. Da Regenwürmer nur einen geringen Teil der in der Streu enthaltenen Energie nutzen können, müssen sie große Mengen an Nahrung aufnehmen. Bodenorganismen der nachfolgenden Größenklassen dient der Kot der Regenwürmer als Nahrung (Topp, 1981).

Die Anzahl der Regenwürmer pro Quadratmeter Boden beträgt durchschnittlich 1-3 Individuen oder 56 g m<sup>-2</sup> Biomasse (Trockengewicht) (Gisi, 1990). In Deutschland sind 39 Arten aus der Familie der Lumbricidae bekannt (Graff 1983), an einem Standort

kommen etwa 2 - 9 Spezies vor (Roembke et al., 1997). Es werden anhand ihres Lebensraumes epigäische (Bewohner der Streuschicht) von anözischen (Tiefgräber) und endogäischen (Bewohner des Mineralhorizontes) Arten unterschieden. Allerdings können die Lumbricidae je nach Lebensalter und Umweltbedingungen in einen anderen Lebensraum wechseln (Römbke, 1997). Regenwürmer reagieren insbesondere auf Bodenfeuchtigkeitsverhältnisse sensibel und sind gegen Trockenheit (< 20 % Bodenfeuchte) sehr empfindlich. Weiterhin hat der pH-Wert des Bodens eine große Bedeutung für die Verbreitung von Regenwürmern. Offenbar bevorzugen die meisten Arten einen neutralen bis leicht basischen pH-Bereich (Römbke, 1997). Wird durch die Kalkung eines sauren Waldbodens der pH-Wert in Richtung Neutralpunkt verschoben, so wandern Regenwürmer auf die zuvor wurmlose Fläche. Diesen Kalkungseffekt kann man jedoch nur auf zuvor sehr sauren Böden beobachten (Römbke, 1997). Gisi (1990) berichtet von einer Verzehnfachung der Regenwurmpopulation nach Kalkung, allerdings bleibt eine Zunahme der Biomasse aus.

#### *Makrofauna*

Zu dieser Größenklasse (2 mm – 2 cm) gehören Vertreter unterschiedlichster physiologischer Tiergruppen wie kleine Regenwürmer, Schnecken, Asseln, Doppelfüßler, Larven von Fluginsekten und Webespinnen. Die Reaktionen der kleinen Regenwürmer auf Bodenkalkung sind mit denen größerer Regenwürmer vergleichbar.

Pro Quadratmeter Boden leben 2 - 3 Asseln (Isopoda) (Gisi, 1990), sie fehlen in Ackerböden jedoch weitgehend (Fründ, 1997). In Deutschland sind fast 50 Arten landlebender Asseln bekannt. Zoologisch werden sie zu den Krebsen (Crustacea) gestellt, daher ist ein wesentlicher Standortfaktor für Asseln die Feuchte bzw. der Wasserhaushalt eines Standortes, allerdings variiert infolge der Anpassung an das Landleben das Ausmaß der Feuchtepräferenz artspezifisch (Fründ 1997). Im Allgemeinen sind Asseln auf basen- und kalkreichen Böden häufiger als auf sauren zu finden (Fründ, 1997). Topp (1981) erklärt, dass Kalk im Panzer oder in der Schale von Schnecken, Asseln und Tausendfüßlern eingelagert ist. Diese Bodentiere sind daher auf verfügbaren Kalk angewiesen und unempfindlich gegenüber hohen pH-Werten. Die Individuenzahlen dieser Bodentiere nehmen bei Kalkmangel ab (Topp, 1981). Fründ (1997) fand jedoch auch an versauerten Standorten Asseln. Scheu (1990) beobachtete bei Bodenversauerung einen Rückzug der saprophagen Makrofauna aus dem Mineralboden in die Streuschicht.

#### *Mesofauna*

Zur Mesofauna gehören Bodentiere mit einer Körpergröße von 0,2 - 2 mm. Nur die größeren Vertreter der

Mesofauna sind mit bloßem Auge wahrnehmbar. In dieser Größenklasse werden Nematoden, Bodenarthropoden wie Milben (Acari) und Collembolen sowie Enchyträen vereinigt.

Nematoden (Fadenwürmer) leben semiaquatisch (Büttner 1988) im dünnen Wasserfilm (Adsorptionswasser, Abb. 1), der die Bodenpartikel umgibt (Topp, 1981, Gisi, 1997). Pro Gramm Boden sind 10-1000 Nematoden vorhanden (Gisi, 1997). Die Nematodenzönose des Bodens ist sehr artenreich, Büttner (1988) geht davon aus, dass zu den 20.000 bekannten Spezies noch etwa 80.000 unbekannte addiert werden müssen. Nematoden werden nach ihrer Ernährungsweise in trophische Gruppen eingeteilt (Gruber, 1994). Es gibt neben omnivoren Spezies auf bestimmte Nahrung spezialisierte Arten, z.B. bakterio- und mykophage Arten sowie carnivore Spezies, die sich von anderen Bodentieren (Protozoen, Bodenarthropoden) ernähren, hinzu kommen endo- und ektophytoparasitäre Arten höherer Pflanzen. Allen gemein sind die der jeweiligen Nahrung angepassten Saugmundwerkzeuge. Neben diesen der Bodenbiozönose zugeordneten Nematoden gibt es eine Vielzahl in Tieren parasitisch lebender Arten (Remane et al., 1985).

Nematoden sind gegenüber abiotischen Lebensbedingungen (Temperatur, Trockenheit) weitgehend unempfindlich, da sie diese über Jahre im Zustand der Anhydrobiose überdauern können (Topp, 1981). Aufgrund ihrer permeablen Kutikula werden sie von den physikochemischen Bedingungen des Bodenporenwassers direkt beeinflusst (Römbke et al., 2002). Büttner (1988) geht davon aus, dass eine abnehmende Abundanz oder das Verschwinden von Arten, die empfindlich auf steigende pH-Werte infolge einer Bodenkalkung reagieren, durch anpassungsfähige (euryöke) Arten ausgeglichen wird, so dass die gesamte Besiedlungsdichte eines Bodens mit Nematoden nicht verändert wird. Nach Yeates (1981) wirkt der pH-Wert eher indirekt auf Nematoden indem dieser wachstumshemmend oder stimulierend auf andere Bodenorganismen und die Pflanzendecke wirkt und somit die Nahrungssituation der Nematoden beeinflusst. Nach Gisi (1997) erhöhen mineralische und organische Düngemaßnahmen im Allgemeinen die Individuenzahlen der Nematoden, da durch die Düngung das Nährstoffangebot zunimmt.

Milben (Acari) werden in die Unterordnungen Hornmilben (Oribatiden) und Raubmilben (Gamasinen) differenziert (Römbke et al., 2002). Hornmilben sind im Allgemeinen phytophag, sie fressen artspezifisch bestimmte Algen, Pilzhyphen oder Flechten (Topp, 1981). Einige Arten können sogar Holz verwerten, andere zersetzen tote Tiere und Kot (Gisi, 1990). Die besonderen Abbauleistungen sind zurückzuführen auf die im Darm von Milben lebenden Symbionten (cellu-

lolytische, xylolytische und chitinolytische Bakterien und Protozoen) (Topp, 1981).

In Mitteleuropa sind 800 - 1000 Arten bekannt (Beck et al., 1996), Römbke et al. (2002) gehen von 550 - 600 Arten aus. Die Besiedlungsdichte eines Ackers beträgt 10.000 - 20.000 Individuen pro Quadratmeter aus etwa 20 Arten, Kiefernwälder haben mit 425.000 die höchste Abundanz aus bis zu etwa 60 Arten (Beck et al., 1997). Neben der Bodenfeuchte ist der pH-Wert des Bodens von zentraler Bedeutung (Beck et al., 1997). Allerdings ist die beobachtete Abundanzzunahme von Oribatiden bei extrem saurem pH eher im Ausfall der Nahrungskonkurrenten zu sehen (Beck et al., 1997). Hagvaar und Abrahamsen (1980) und Koskenniemi und auch Huhta (1986) fanden nach Kompensationskalkungen mit raschem Anstieg des pH-Wertes eine Reduktion der Oribatiden-Besiedlungsdichte.

Raubmilben sind in Mitteleuropa mit ebenfalls 800 - 1000 Arten bekannt, an einem Standort werden durchschnittlich jedoch weniger als 100 Arten gefunden (Ruf, 1997). Sie sind in vielen Böden nur mäßig abundant (Römbke et al., 2002). Auf Ackerflächen siedeln etwa 2.000 - 120.000 Individuen pro Quadratmeter, auf Grünland 2.600 - 20.000 und im Waldboden bis zu 35.000 (Römbke et al., 2002). Viele Raubmilben ernähren sich vorwiegend von Nematoden. Daher spiegeln die Abundanzen der Gamasinen unter Umständen nur die Reaktion der Nematoden auf deren Lebensbedingungen wider (Ruf, 1997). Einige Gamasinen scheinen durch basische Verhältnisse, andere durch saure begünstigt zu werden. Eine Kalkdüngung im Wald bewirkte in einem von Römbke et al. (2002) zitierten Versuch einen Anstieg der Diversität im Gamasinen-Artengefüge.

Taxonomisch werden Regenwürmer (Lumbriciden) und die kleineren Enchytraeiden aufgrund des sehr ähnlichen Körperbaus als Anneliden zusammengefasst. Enchytraeiden kommen außer an sehr trockenen Standorten mit sehr hohen Dichten, etwa 20.000 - 60.000 Individuen pro Quadratmeter, in der Streuauflage und im Mineralboden vor (Römbke et al., 2002). In Mitteleuropa gibt es 200 - 300 Arten. Enchytraeiden ernähren sich saprophytisch oder mikrophytophag. Einige Arten können wie Regenwürmer unzersetztes Laub aufnehmen und treten damit mit diesen in Nahrungskonkurrenz. Oft liegt die Abundanz der Enchytraeiden an sauren Standorten höher als auf basischen Flächen. Offenbar wiegt hier der Standortfaktor „Nahrungsangebot“ stärker als der Faktor „pH-Wert“. Didden (1993) fand allerdings keine Korrelation zwischen dem pH-Wert des Bodens und der Abundanz von Enchytraeiden. Auf Standorten mit pH-Werten von 3,9 bis 6,4 nahm die Artenzahl mit steigendem pH-Wert zu (Abrahamsen, 1972). Eine Bodenkalkung führt zum Rückgang acidophiler Arten, dieser Rückgang wird jedoch nicht von Enchytraeiden

mit neutralem oder basischem pH-Optimum ausgeglichen, da Regenwürmer durch den höheren pH-Wert gefördert werden und die Enchytraeiden am gekalkten Standort verdrängen.

#### *Mikrofauna*

Vertreter der Mikrofauna sind die Protozoa (Einzeller = Flagellata, Rhizopoda, Ciliata). Protozoen leben vorwiegend in den oberen 10 cm des Bodens in wassergefüllten Poren und in dem dünnen Wasserfilm, der Bodenpartikel und Wurzeln umgibt (Abb.1). Sie sind mit einer Abundanz von  $10^4$  -  $10^6$  Individuen pro g Boden die häufigsten Bodentiere, jedoch kann sich die Anzahl der Individuen sehr rasch ändern, da eine starke Abhängigkeit vom Wassergehalt des Bodens besteht (Gisi, 1990). Trockenperioden überdauern sie als Zysten, die nach Regen sehr schnell erneut auskeimen (Lehle, 1990). Protozoen ernähren sich vorwiegend von Bakterien, aber auch von Algen, Pilzen oder unterirdischen Pflanzenorganen (Lehle, 1990).

Protozoen reagieren in der Regel schneller als Metazoen auf Veränderungen der Standortfaktoren. Bei günstigen Lebensbedingungen vermehren sie sich rasch, sie haben daher ein hohes bioindikatives Potential. Artenassoziationen können häufig mit bestimmten Habitatbedingungen korreliert werden (Lehle, 1990).

Einige Protozoen wie z.B. die Flagellaten (Geißeltierchen) bevorzugen basische Böden. Rhizopoden (beschaltete und nackte Amöben) reagieren empfindlich auf wechselnde Boden-pH-Werte. Die nackten Amöben (Amoebina) bilden beim Rückgang des Kapillarswassers sehr resistente Zysten. Beschaltete Amöben (Testacea) sind im sauren Boden besonders häufig, mit zunehmendem pH-Wert nimmt ihre Abundanz ab (Lehle, 1990). Ciliaten (Wimperntierchen) bevorzugen nach Gisi (1990) Kalkböden. Lehle (1990) hingegen stuft die Ciliaten als eurypotent ein (also einen großen pH-Wert-Bereich tolerierend) und berichtet von Ciliaten an extrem sauren Standorten (pH 2,7).

Eine Bodenkalkung wirkt sich auf die Protozoen unterschiedlich aus. Die Auswirkungen werden anhand der Zusammensetzung des Artenspektrums und der Zu- oder Abnahme der Anzahl der Individuen einer Art ermittelt. Manche Arten reagieren relativ schnell, andere mit mehrmonatiger Verzögerung. Die Kalkung sehr saurer Böden bewirkt im Allgemeinen eine Zunahme der Individuen als auch die Erweiterung des Artenspektrums. Die „neuen“ Arten können durch Windanflug, Zoochorie (Verbreitung durch Tiere) oder durch Auskeimen von Dauerzysten den Standort besiedeln. Lehle (1990) beobachtete nach einer Bodenkalkung die Zunahme der bakteriophagen Ciliaten, bei versauernden Böden nehmen mycetophage Ciliaten zu.

*Mikroflora*

Pilze und Bakterien stellen den größten Anteil der Biomasse und mit bis zu  $10^8$  Zellen pro Gramm Boden die größte Anzahl an Organismen im Boden dar (Römbke, 1997). Die Streuschicht kann höhere Besiedelungsdichten aufweisen (Förster, 1994). Die überwiegende Anzahl von Mikroorganismen besiedelt Standorte mit einem pH-Wert im Bereich von 6 - 9. Neutrophile Mikroorganismen haben ein pH-Optimum zwischen pH 6,2 und 7,8. Über pH 8 nimmt der Anteil der alkaliphilen Mikroorganismen zu, unter pH 6 der der Acidophilen (Schlegel, 1992). Pilze präferieren pH-Werte im Boden von  $\leq 5,5$  (Metting, 1993).

Grundsätzlich kann davon ausgegangen werden, dass durch die mit einer Bodenkalkung einhergehenden Anhebung des pH-Wertes das Artenspektrum der im Boden vorkommenden Mikroorganismen in Richtung Bakterien verschoben wird, d.h. die pilzliche Biomasse nimmt ab, während die bakterielle Biomasse zunimmt (Förster, 1994). Diese Verschiebung des Artenspektrums wird vorwiegend in der Humusauflage, dem O-Horizont, deutlich (Kreutzer, 1995).

**Schlussfolgerungen**

Eine moderate Bodenkalkung hat eine positive Wirkung auf das Bodenleben. Durch die Stabilisierung des Boden-pH-Wertes im leicht sauren bis neutralen Bereich und durch Stärkung des Hohlraumsystems wird die Biodiversität der Bodenbiozönose gefördert.

**Literatur**

**Abrahamsen G** (1972) Ecological study of Enchytraeidae (Oligochaeta) in Norwegian coniferous forest soils. *Pedobiologia* 12: 26-82

**Anderson JM, Ineson P** (1984) Interactions between microorganisms and soil invertebrates in nutrient flux pathways of forest ecosystems. In: Anderson J.M., Rayner A.D.M., Walton D.W.H. (Eds.) *Invertebrate-microbial interactions*, Cambridge University Press, 59-88

**Beck L, Woas S, Horak F** (1997) Oribatida. In: Römbke J. et al. (1997) *Boden als Lebensraum für Bodenorganismen* [online]. Karlsruhe, zu finden in <http://www.xfaweb.baden-wuerttemberg.de/bofaweb/berichte/tbb04/tbb04.htm> [zitiert am 26.01.2004]

**Beck L, Woas S, Horak F** (1997) Taxonomische Ebenen als Basis der Bodenindikation – Fallbeispiele aus der Gruppe der Oribatiden (Acari). *Abh. Ber. Naturkundemus. Görlitz* 69: 67-85

Büttner V. (1988) *Untersuchungen zur Ökologie der Nematoden eines Kalkbuchenwaldes*. Göttingen, Dissertation, 213 p

**Darwin C** (1904) *The formation of vegetable mould through the action of worms with observations on their habits*. London : Murray, 298 p

**Didden W** (1993) Ecology of terrestrial Enchytraeidae. *Pedobiologia* 37: 2-29

**Dunger W** (1978) Parameter der Bodenfauna in einer Catena von Rasen-Ökosystemen. *Pedobiologica* 18: 310-340

**Durner W** (2002) So nah und doch so fern... Die Bodenzone als terra incognita der Geowissenschaften. Antrittsvorlesung an der TU Braunschweig am 04.12.2002

**Förster B** (1994) *Untersuchungen zur Rolle der Mikroorganismen im Dekompositionsprozeß eines Wiesen und eines Waldökosystems unter dem Einfluß des Fungizids Carbendazim*. Frankfurt/Main, Dissertation, 193 p

**Fründ H-C** (1997) Diplopoda und Isopoda. In: Römbke J. et al. (1997) *Boden als Lebensraum für Bodenorganismen* [online]. Karlsruhe, zu finden in <http://www.xfaweb.baden-wuerttemberg.de/bofaweb/berichte/tbb04/tbb04.htm> [zitiert am 26.01.2004]

**Gisi U** (1990) *Bodenökologie*. Stuttgart : Thieme, 304 p, ISBN 8-13-747201-6

**Graff O** (1983) *Unsere Regenwürmer – Lexikon für Freunde der Bodenbiologie*. Hannover : Verlag M.& H. Schaper, 112 p, ISBN 3-7944-0127-1

**Gruber U** (1994) *Auswirkungen der Rotationsbrache auf Nematoden, Schnecken und Getreidefußkrankheiten*. Hohenheim, Dissertation, 87 p

**Hagvar S, Abrahamsen G** (1980) Colonization by Enchytraeidae, Collembola and Acari in sterile soil samples with adjusted pH levels. *Oikos* 34: 245-258

**Kreutzer K** (1995) Effects of forest liming on soil processes. *Plant and Soil* 168-169: 447-470

**Koskenniemi A, Huhta V** (1986) Effects of fertilization and manipulation of pH on mite (Acari) populations of coniferous forest soil. *Rev Ecol Biol Sol* 23: 271-286

**Lehle E** (1990) *Zur Ökologie von Bodenorganismen von Bodenciliaten (Protozoa: Ciliophora): Qualitativ-quantitative Untersuchungen in terrestrischen Ökosystemen*. Freiburg (Breisgau) : Hochschulverlag

**Metting FB** (1993) Structure and Physiological Ecology of Soil Microbial Communities. In: Metting F.B., Blaine F. *Soil Microbial Ecology*. New York: Marcel Dekker Inc , pp 3-25, ISBN 0-8247-8737-4

**Remane A, Storch V, Welsch U** (1985) *Kurzes Lehrbuch der Zoologie*. Stuttgart: Gustav Fischer Verlag, 561 p, ISBN 3-437-20337-1

**Römbke J** (1997) Lumbricidae. In: Römbke J. et al. (1997) *Boden als Lebensraum für Bodenorganismen* [online]. Karlsruhe, zu finden in

<http://www.xfaweb.baden-wuerttemberg.de/bofaweb/berichte/tbb04/tbb04.htm>  
[zitiert am 26.01.2004]

**Römbke J** (1997) Boden als Lebensraum für Bodenorganismen [online]. Karlsruhe, zu finden in <http://www.xfaweb.baden-wuerttemberg.de/bofaweb/berichte/tbb04/tbb04.htm>  
[zitiert am 26.01.2004]

**Römbke J** (2002) Entwicklung von biologischen Bodengüteklassen für Acker- und Grünlandstandorte. Berlin: Umweltbundesamt, 273 p, ISSN 0722-186X

**Ruf A** (1997) Gamasina. In: Römbke J. et al. (1997) Boden als Lebensraum für Bodenorganismen [online]. Karlsruhe, zu finden in <http://www.xfaweb.baden-wuerttemberg.de/bofaweb/berichte/tbb04/tbb04.htm>  
[zitiert am 26.01.2004]

**Schlegel HG** (1992) Allgemeine Mikrobiologie. Stuttgart, Thieme Verlag, 634 p

**Scheu S** (1990) Die saprophage Makrofauna (Diplopoda, Isopoda und Lumbricidae) in Lebensräumen auf Kalkgestein: Sukzession und Stoffumsatz. Göttingen. Berichte des Forschungszentrums Waldökosysteme, Reihe A, Bd. 57, 302 p

**Ruf A** (1997) Gamasina. In: Römbke J. et al. (1997) Boden als Lebensraum für Bodenorganismen [online]. Karlsruhe, zu finden in <http://www.xfaweb.baden-wuerttemberg.de/bofaweb/berichte/tbb04/tbb04.htm>  
[zitiert am 26.01.2004]

**Topp W** (1981) Biologie der Bodenorganismen. Heidelberg : Quelle und Meyer, 224 p, UTB 1101, ISBN 3-494-0219-5

**Yeates GW** (1981) Nematode populations in relation to soil environmental factors: a review. *Pedobiologica* 22: 312-338

