

VBB-Bulletin Nr. 15 / Mai 2013

1. Bericht der Präsidentin	1
2. Tätigkeiten der Projektgruppen	3
2.1. Projektgruppe <i>Wissensaustausch und Öffentlichkeitsarbeit</i>	3
2.2. Projektgruppe <i>Mikrobiologie</i>	3
2.3. Projektgruppe <i>Mykorrhiza</i>	3
2.4. Projektgruppe <i>Fauna</i>	3
2.5. Projektgruppe <i>Langzeitbeobachtung</i>	3
3. Ausgewählte Projekte der VBB	4
3.1. 25 Jahre Beobachtung der Bodenbiologie im Kanton Freiburg	4
4. Forum	8
4.1. Bodenbiodiversität in subalpinen Auengebieten: Regenwürmer (Lumbricidae) und Springschwänze (Collembola)	8
4.2. Die karbonatisierte Biomineralisation: eine kurze Bestandsaufnahme in den Böden	13

1. Bericht der Präsidentin

Claudia Maurer-Troxler
Amt für Landwirtschaft und Natur des Kantons Bern – Fachstelle Bodenschutz
Rütti, 3052 Zollikofen

Biodiversität: Vielfalt des Lebens – auf und im Boden

Weltweit wird ein dramatischer Verlust von Biodiversität festgestellt. Die grosse Vielfalt an Lebensräumen, Ökosystemen, Tier- und Pflanzenarten, Pilzen, Mikroorganismen und deren genetische Vielfalt ist für unser Überleben aber von entscheidender Bedeutung.

Mit der Ratifizierung der Biodiversitätskonvention 1994 verpflichtete sich auch die Schweiz, die biologische Vielfalt zu erhalten und ihre Bestandteile nachhaltig und gerecht zu nutzen. Das BAFU erarbeitete 2012 die „Strategie Biodiversität Schweiz“ und formulierte im Aktionsplan die Schwerpunkte in zehn Zielen, an denen sich die

Akteure in den kommenden Jahren orientieren müssen, um die Biodiversität und ihre Leistungen langfristig zu erhalten und zu fördern.

Biotopinventare, Waldschutzflächen, Listen bedrohter Arten, Biodiversitäts-Monitoring, Qualität und Vernetzung ökologischer Ausgleichsflächen in der Landwirtschaft – dies sind zahlreiche Instrumente, um die oberirdische Biodiversität zu messen und zu fördern. Wie aber steht es mit der unterirdischen Vielfalt, den unzähligen bekannten und noch mehr unbekanntem Tieren, Pilzen, Mikroorganismen und Algen im Boden? Sie bildet die Grundlage für die oberirdische Vielfalt und ihre Leistungen sichern uns Nahrung, sauberes Wasser und gute Luft.

Menge und Vielfalt an Lebewesen im Boden sind weitaus grösser als diejenige auf dem Boden – und doch geht dies oft vergessen. Die Gruppe VBB hat es sich zur Aufgabe gemacht, die Bodenlebewesen immer wieder ins Zentrum zu rücken, ihre Bedeutung für den Boden zu messen und aufzuzeigen. So wurde das NABO bereits um biologische Parameter erweitert und im Biodiversitätsmonitoring wurden im vergangenen Jahr erstmals auch Bodenproben genommen. Zukünftige Diskussionen in der Gruppe werden zeigen, ob hier und im Aktionsplan der Biodiversitätsstrategie bodenbiologische Fragestellungen und Erhebungen einfließen werden.

Das Thema Bodenbiodiversität findet sich in unterschiedlicher Form in zahlreichen Beiträgen des vorliegenden Bulletins: in laufenden Arbeiten verschiedener Projektgruppen – Mikrobiologie, Mykorrhiza und Fauna (Seite 3), im langjährigen Monitoring des Kantons Fribourg (Seite 4) und im Forum, wo der VBB-Gruppe Untersuchungen von Forschungsinstitutionen vorgestellt werden (Seite 8-18).

Name und Arbeitsinhalt	Mitglieder	Kontaktperson
Wissensaustausch und Öffentlichkeitsarbeit		
<ul style="list-style-type: none"> - Information und Sensibilisierung der Öffentlichkeit für den Bodenschutz - Erfahrungs- und Wissensaustausch 	E. Havlicek (OFEV) C. Maurer-Troxler (BE) D. Mösch (AG) D. Marugg (SG) D. Schmutz (BL) R. von Arx (BAFU) G. von Rohr (SO) T. Wegelin (ZH) D. Widmer (LU)	Daniela Marugg Baudepartement, Amt für Umwelt und Energie des Kantons St. Gallen Lämmli Brunnenstrasse 54 CH-9001 St. Gallen Tel. 058 229 43 41 daniela.marugg@sg.ch
Mikrobiologie		
<ul style="list-style-type: none"> - Erarbeiten und Validieren von Probenahmestrategien (Wiese, Acker, Wald) - Auswahl, Standardisierung und Validierung von Methoden - Dokumentation der räumlichen und zeitlichen Variabilität - Erarbeiten von Interpretationsgrundlagen (Referenzwertmodelle) 	W. Heller (ACW) A. Fliessbach (FiBL) P. Mäder (FiBL) H.-R. Oberholzer (ART)	Dr. Hans-Rudolf Oberholzer Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon ART Reckenholzstrasse 191 CH-8046 Zürich Tel. 01 377 72 97 hansrudolf.oberholzer@agroscope.admin.ch
Mykorrhiza		
<ul style="list-style-type: none"> - Erarbeiten und Validieren von Standardmethoden zur Beschreibung des Mykorrhiza-Zustandes von Böden 	S. Egli (WSL) H. Gamper (ETH) C. Maurer-Troxler (BE) P. Mäder (FiBL) H.R. Oberholzer (ART) F. Oehl (ART)	Dr. Simon Egli WSL Zürcherstrasse 111 CH-8903 Birmensdorf Tel. 01 739 22 71 simon.egli@wsl.ch
Fauna		
<ul style="list-style-type: none"> - Methoden zur Erfassung der Bodentiere evaluieren, standardisieren und in Fallstudien testen - Entwicklung von ökotoxikologischen Testmethoden 	S. Campiche (Centre Ecotox) E. Havlicek (BAFU) C. Maurer-Troxler (BE) L. Pfiffner (FiBL)	Dr. Claudia Maurer-Troxler Amt für Landwirtschaft und Natur des Kantons Bern – Fachstelle Bodenschutz, Rütli CH-3052 Zollikofen Tel. 031 910 53 33 claudia.maurer@vol.be.ch
Langzeitbeobachtung (Aktivitäten sistiert)		
<ul style="list-style-type: none"> - Koordination von bodenbiologischen Untersuchungen in KABO's - Pilotuntersuchungen zur Langzeitbeobachtung (Zusammenarbeit mit ART-Projekt) 	U. Gasser (ZH) C. Maurer-Troxler (BE) H.-R. Oberholzer (ART) D. Mösch (AG) D. Marugg (SG) G. Schmid (SG) P. Schwab (ART)	Dr. Claudia Maurer-Troxler Amt für Landwirtschaft und Natur des Kantons Bern – Fachstelle Bodenschutz, Rütli CH-3052 Zollikofen Tel. 031 910 53 33 claudia.maurer@vol.be.ch

2. Tätigkeiten der Projektgruppen

2.1. Projektgruppe *Wissensaustausch und Öffentlichkeitsarbeit*

Daniela Marugg, Baudepartement, Amt für Umwelt und Energie Kanton St. Gallen

Die Projektgruppe beschäftigt sich weiterhin mit der Überarbeitung des KMSOIL, konnte aber seit Frühling 2012 keine Sitzung mehr durchführen. In einer ersten Phase wurde im Frühsommer 2012 die Verbesserung des bestehenden KMSOIL in Angriff genommen. Der Servicepoint des BAFU konnte diese Arbeiten erledigen. Wenn Probleme mit dem KMSOIL auftreten und diese dem Servicepoint gemeldet werden, werden sie innerhalb kurzer Zeit erledigt. Die Performance des KMSOIL konnte verbessert werden. Die zweite Phase, nämlich die Gesamtüberarbeitung des KMSOIL, zieht sich leider in die Länge. Die Projektgruppe wartet seit Sommer 2012 darauf, dass die BAFU-Direktion den Grundsatz-Entscheid fällt, ob das KMSOIL weiterhin im GEVER-System angegliedert sein soll und bei dessen Überarbeitung verbessert wird oder ob es vom GEVER-System herausgelöst werden soll. In letzterem Fall müsste KMSOIL extern neu aufgebaut und die Systempflege geregelt werden. Die Kosten dieser Arbeiten müssten die beteiligten Kantone und das BAFU zusammen übernehmen. Der Entscheid wurde auf Sommer 2013 vertagt.

2.2. Projektgruppe *Mikrobiologie*

Hans-Rudolf Oberholzer, Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon ART

In der Projektgruppe Mikrobiologie wurden im vergangenen Jahr keine spezifischen Aktivitäten durchgeführt. Die Mitglieder waren in andern Gruppen der VBB aktiv.

2.3. Projektgruppe *Mykorrhiza*

Simon Egli, WSL Birmensdorf

Im Rahmen des Projekts Mykorrhiza-Infektionspotential wurden zusätzlich die Bodenproben der 154 untersuchten schweizerischen Landwirtschaftsböden bezüglich ihrer Sporendiversität analysiert. Sporen von arbuskulären Mykorrhizapilzen wurden aus Bodenproben mittels Nass-Siebung mit nachfolgender Zucker-Gradient-Zentrifugation extrahiert und die Sporen nach morphologischen Merkmalen und zellulären Strukturen identifiziert. Die Resultate dieser

Untersuchung werden in die Schlussergebnisse des Projekts einfließen.

2.4. Projektgruppe *Fauna*

Claudia Maurer-Troxler, Amt für Landwirtschaft und Natur des Kantons Bern – Fachstelle Bodenschutz

Anhand einer vorbereiteten Tabelle werden Universitäten, Forschungsinstitutionen und Naturmuseen angeschrieben, um die bisher in der Schweiz erhobenen bodenzoologischen und bodenmikrobiologischen Untersuchungen zusammenzutragen. Diese Zusammenstellung wird es erlauben, den Ist-Zustand zu erfassen und Lücken für zukünftige Erhebungen aufzuzeigen. Die Zusammenstellung liefert Grundlagen zur Erfassung der Boden-Biodiversität im Rahmen der Biodiversitätsstrategie des Bundesamts für Umwelt (BAFU) und zur Erarbeitung von Bodenbioindikatoren im Rahmen der Nationalen Bodenbeobachtung NABO. Diese Datengrundlage wird auch für weitere Nutzer zugänglich sein.

2.5. Projektgruppe *Langzeitbeobachtung*

Claudia Maurer-Troxler, Amt für Landwirtschaft und Natur des Kantons Bern – Fachstelle Bodenschutz

Peter Schwab, Projektleitung LAZBO, FB14.2 (NABO) ART (AG, BE, SG, ZH)

Die AG Langzeitbeobachtung ist momentan sistiert.

3. Ausgewählte Projekte der VBB

3.1. 25 Jahre Beobachtung der Bodenbiologie im Kanton Freiburg

Nicolas Rossier

Landwirtschaftliches Institut Grangeneuve
CH1725 Posieux
rossiern@fr.ch
Tel. 026 305 58 74

Einleitung

Das Freiburgische Bodenbeobachtungsnetz (FRIBO) wurde zwischen 1987 und 1991 aufgebaut. Oberstes Ziel dieses Netzes ist es, bodenkundliche, landwirtschaftliche und Umwelt-bezogene Daten über die landwirtschaftlichen Böden des Kantons Freiburg zu sammeln. Das Netz umfasst insgesamt 250 Standorte, die sich auf einem Raster von 2 x 2 km über den ganzen Kanton verteilen. Für jeden Beobachtungszyklus werden jährlich auf 50 Parzellen in einer Tiefe von 0 bis 20 cm Proben entnommen. Jeder dieser Standorte wird folglich alle fünf Jahre einmal untersucht, was jeweils einem Analysezyklus entspricht.

Für die 25-jährige Beobachtung der landwirtschaftlichen Böden verteilen sich die Zyklen wie folgt:

Zyklus 1	Zyklus 2	Zyklus 3	Zyklus 4	Zyklus 5
1987– 1991	1992– 1996	1997– 2001	2002– 2006	2007– 2011

Die 250 Standorte des Beobachtungsnetzes wurden je nach der landwirtschaftlichen Nutzung des Bodens in drei Klassen aufgeteilt. Die drei verwendeten Nutzungstypen sind Ackerflächen (TA), Dauerwiesen (PP) und Alpweiden (ALP). Die Alpweiden sind selbstverständlich Dauerwiesen, die aber nur als Sommerweiden genutzt werden und nicht zur landwirtschaftlichen Nutzfläche (LN) gehören. Die Karte (Abbildung 3.1.1) veranschaulicht alle Standorte im Kanton Freiburg nach Nutzungstyp und zeigt die Grenzen der sieben Bezirke des Kantons auf.

Dieser Artikel beschreibt die Entwicklung der zwei biologischen Parameter, die Hinweise für die Bodenfruchtbarkeit geben und im FRIBO-Bericht über die Entwicklung der biologischen Parameter (Rossier und Dessureault-Rompré, 2003) erläutert werden. Analysiert wurden der Gehalt an Biomasse ATP und die Mineralisierung von organischem Kohlenstoff nach Maire (1984). Es handelt sich um einen Auszug aus dem fünften FRIBO-Bericht (Rossier et al., 2012).

Biomasse ATP

Adenosintriphosphat (ATP) ist in allen biologischen Zellen enthalten. Da sich dieses Molekül beim Absterben lebender Zellen in einer Hydrolyse aufspaltet, eignet er sich gut als Marker für Lebewesen. Es dient in den meisten biochemischen Reaktionen zur Energiebereitstellung und als Energiereserve und fungiert folglich für die Mikroorganismen als Energiequelle. Mit der Messung von ATP kann die Gesamtmasse an lebenden Mikroorganismen pro Bodeneinheit geschätzt werden. Der Biomasse ATP Gehalt ist vom Ton- und Humusgehalt der Böden abhängig.

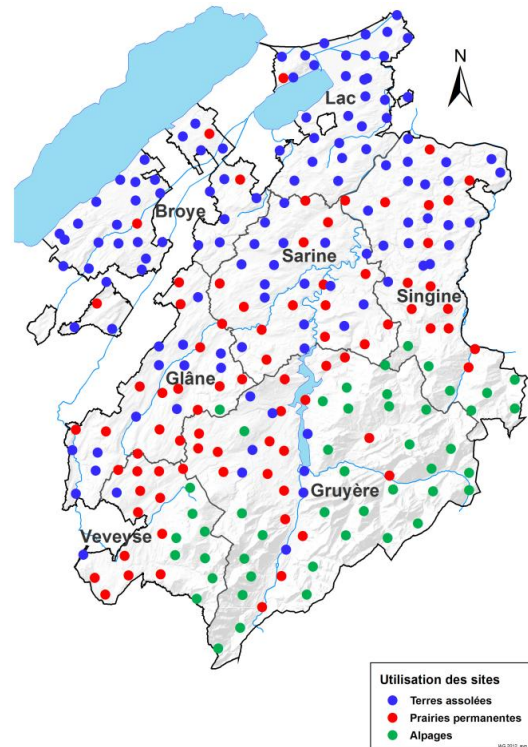


Abbildung 3.1.1 Lokalisierung und Nutzung der FRIBO-Standorte.

Abbildung 3.1.2 zeigt deutlich, dass sich die Ackerflächen (TA) im Vergleich zu den Dauerwiesen (PP) und den Alpweiden (ALP) durch eine schwächere mikrobielle Flora auszeichnen. Diese Unterschiede resultieren, wie von Rossier und Dessureault-Rompré (2003) in ihrem Bericht über die biologischen Parameter erwähnt, aus dem Gehalt an organischem Material der Böden und aus der Bewirtschaftung. Durch die intensive Bearbeitung der Ackerflächen schwankt die Wurzelbiomasse enorm, was die natürliche Aktivität der Mikroorganismen stört. Die Böden unter Dauerwiesen sind viel stabiler, weil sich der Humus und damit auch die mikrobielle Biomasse dauernd erneuern.

Unabhängig von der Bewirtschaftung nimmt die mikrobielle Biomasse im Verlauf der fünf Messzyklen des FRIBO-Netzes ständig und signifikant

ab. Die Abnahmen bewegen sich für die drei Bodennutzungstypen in derselben Grössenordnung, d. h. 41 Prozent bei den Ackerflächen, 44 Prozent bei den Dauerwiesen und 43 Prozent bei den Alpweiden. Dieser Rückgang der Anzahl Mikroorganismen in den Böden ist beunruhigend und nach unserem heutigen Kenntnisstand sehr schwer erklärbar.

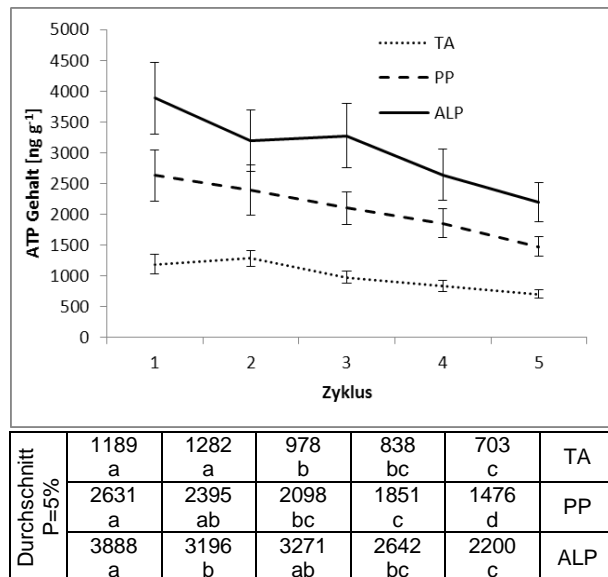


Abbildung 3.1.2 Entwicklung des Biomasse ATP Gehalts.

Es gibt mehrere Hypothesen:

- Der durchschnittliche Temperaturanstieg lässt den Mikroorganismen mehr Zeit, um ihre Arbeit zu tun, doch parallel dazu steigt das Nahrungsangebot nicht an, was letztlich zum Rückgang ihrer Populationen führt.
- Klimatische Ausnahmeereignisse wie Trockenheit, Hitzewellen und grosse Kälteperioden stören das Leben und die Fortpflanzung der Mikroorganismen.
- Die diffusen Umweltverschmutzungen beeinträchtigen die Mikroorganismen und erhöhen ihre Sterblichkeit – ein Phänomen, das mit dem Bienensterben vergleichbar ist.
- Die analytische Methode, insbesondere die jährliche Kalibrierung der Messgeräte, ist nicht stabil.
- Das Ausbringen von sehr aggressiven organischen Düngemitteln, wie nicht behandelte Gülle, tötet und hemmt zahlreiche Mikroorganismen. Dass Gülle sich aggressiv auf Lebewesen auswirkt, ist bekannt. Ausserdem wird dieser Düngertyp mit der zunehmenden Verbreitung von Laufställen auf Gitterrosten und dem damit einhergehenden Rückgang der Mistproduktion immer häufiger eingesetzt.

Der Biomasse ATP Gehalt ist stark mit dem Gehalt an organischer Substanz korreliert. Die

Analysen zeigen jedoch, dass dieser unverändert blieb. Daher können wir die Hypothese, dass den Mikroorganismen ein ungenügendes Nahrungsangebot zur Verfügung steht, ausschliessen. Ausserdem ist ihre Aktivität, die durch die Mineralisierung von organischem Kohlenstoff dargestellt wird, insgesamt stabil geblieben (Abbildung 3.1.6).

Entwicklung pro Standort

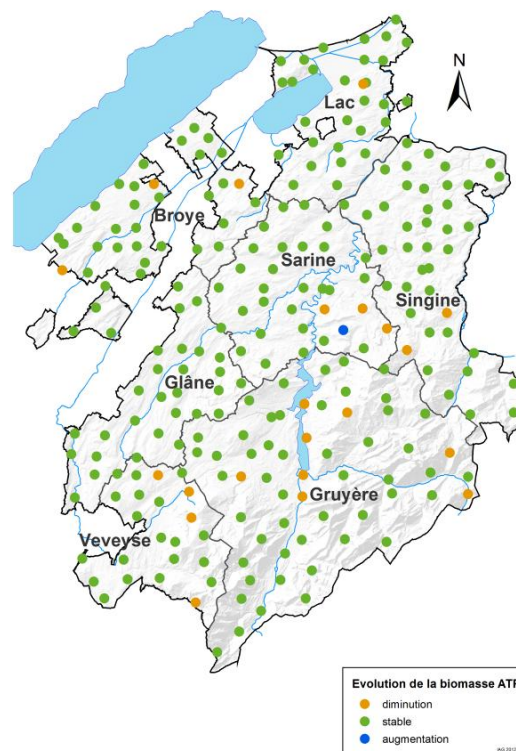


Abbildung 3.1.3 Entwicklung des Gehalts an Biomasse ATP pro Standort im Laufe der fünf Zyklen.

Bei 21 Standorten nahm der Gehalt an Biomasse ATP signifikant ab (Abbildung 3.1.3). Es handelt sich um acht Ackerflächen, sechs Dauerwiesen und sieben Alpweiden. Die Ackerstandorte leiden in der Rotation unter einem Mangel an temporärer Begrünung. Mehrere Alpweiden liegen in schwierigem Gelände, an instabilen, hydromorphen oder flachgründigen Standorten. Die Ursachen für den Rückgang der Biomasse auf Dauerwiesen sind unterschiedlich (Trittschäden, Veränderung der Nutzung, Anpassung usw.). 81 Prozent der Standorte mit abnehmender Biomasse befinden sich in Graswirtschafts- und Viehwirtschaftsgebieten im Süden des Kantons, was die Hypothese der Toxizität der Hofdüngemittel stützt. Leider erheben wir die Düngepraktiken nicht, sodass wir keine bezifferte Korrelation zwischen Dünger und Biomasse ATP herstellen können.

An einem einzigen Standort nahm die Biomasse zu. Es handelt sich um einen Ackerstandort mit steigendem Anteil an temporärer Begrünung.

Beurteilung gemäss Freiburger Massstab

Die Gruppe Vollzug Bodenbiologie (VBB) hat 2009 eine Arbeitshilfe zur Anwendung und Interpretation bodenbiologischer Parameter (VBB, 2009) publiziert. Wir haben an dieser Publikation mitgewirkt und die anhand der Regressionsanalyse aller FRIBO-Standorte neu berechneten Massstäbe eingefügt. Diese Massstäbe werden für die nachfolgenden Interpretationen herangezogen.

Unabhängig von der Bodennutzung ist der Anteil der Standorte in der Klasse «arm» im Steigen begriffen (Abbildung 3.1.4), und die sehr reichen Böden nehmen im Gegenzug ab. Der Anteil der als genügend eingestuften Böden bewegt sich bei den Ackerflächen und den Dauerwiesen um 30 Prozent und um 50 Prozent bei den Alpweiden. Diese Resultate belegen die Biomasseverarmung der Böden, die in Abbildung 3.1.3 dargestellt ist.

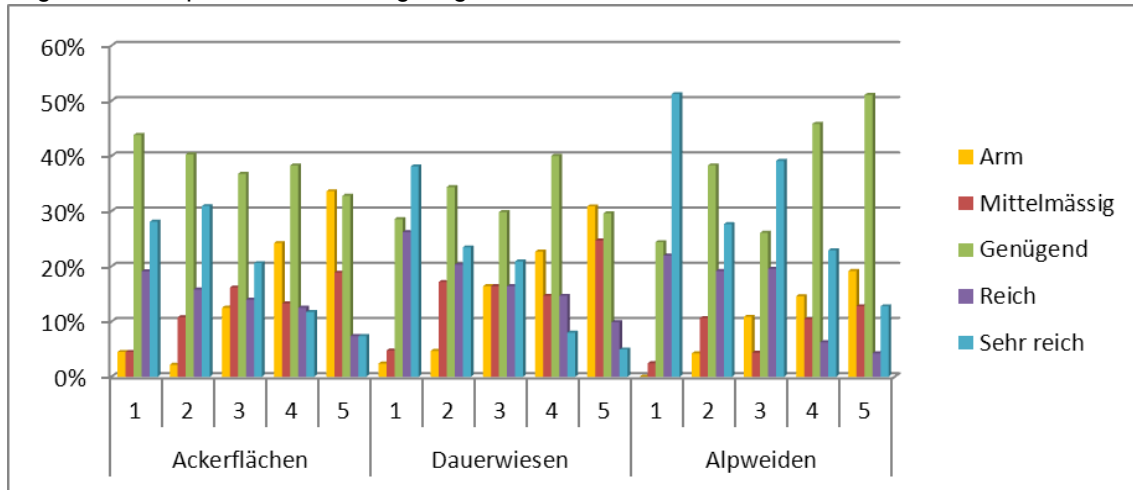


Abbildung 3.1.4 Verteilung der Standorte nach Beurteilung des Biomasse ATP gemäss Freiburger Massstab.

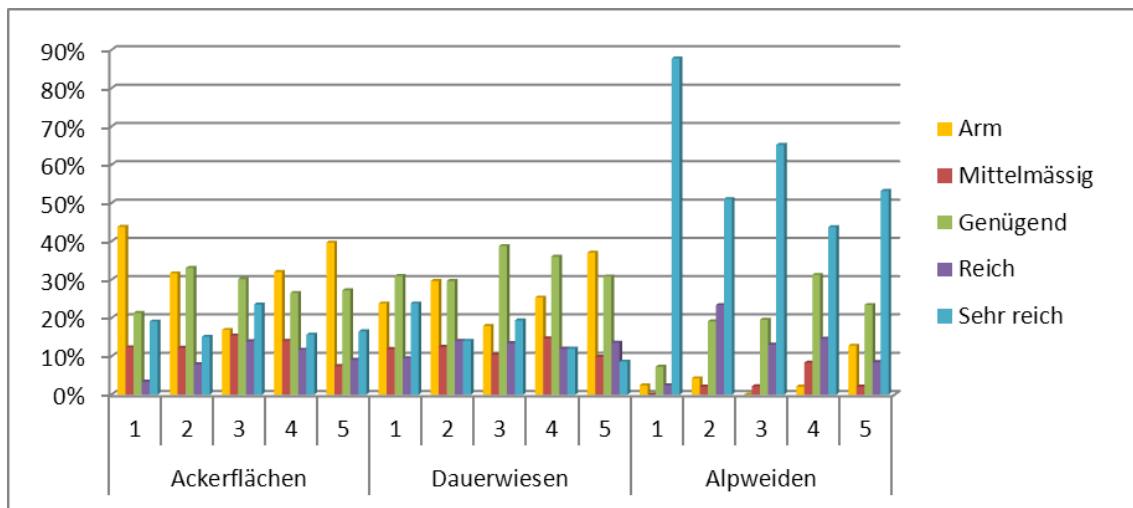


Abbildung 3.1.5 Verteilung der Standorte nach Beurteilung der Mineralisierung von organischem Kohlenstoff gemäss Freiburger Massstab.

Mineralisierung des organischen Kohlenstoffs

Die Mineralisierung des organischen Kohlenstoffs lässt sich aus der Menge der mineralisierten organischen Substanz während der Inkubation feststellen (durch die Biomasse während der Inkubationsdauer verrichtete Arbeit). Es handelt sich um die Summe des während der 15-tägigen Inkubation freigesetzten CO₂, umgerechnet in die entsprechende organische Substanz. Dieser Wert

fasst die drei Messungen der Atmungsaktivität, die im Bericht über die biologischen Parameter (Rossier und Dessureault-Rompré, 2003) analysiert wurden, gut zusammen.

Die Mineralisierung des organischen Kohlenstoffs durch die mikrobielle Biomasse ist von der Bewirtschaftung des Bodens abhängig (Abbildung 3.1.6). Eine grössere mikrobielle Biomasse kann pro Gramm Boden in einer Zeitspanne von

15 Tagen potenziell eine grössere Menge organischer Substanz mineralisieren. Die Böden von Dauerwiesen und Alpweiden weisen daher ein grösseres Mineralisierungspotenzial auf. Einerseits, weil sie im Durchschnitt einen höheren Humus- und Tongehalt aufweisen und andererseits durch den Einfluss der dauerhaften Begrünung.

Bei den Alpweiden beobachtet man eine signifikante Abnahme der Werte nach dem ersten Zyklus und anschliessend stabile Werte. Die Werte der Ackerflächen und Dauerwiesen sind stabil.

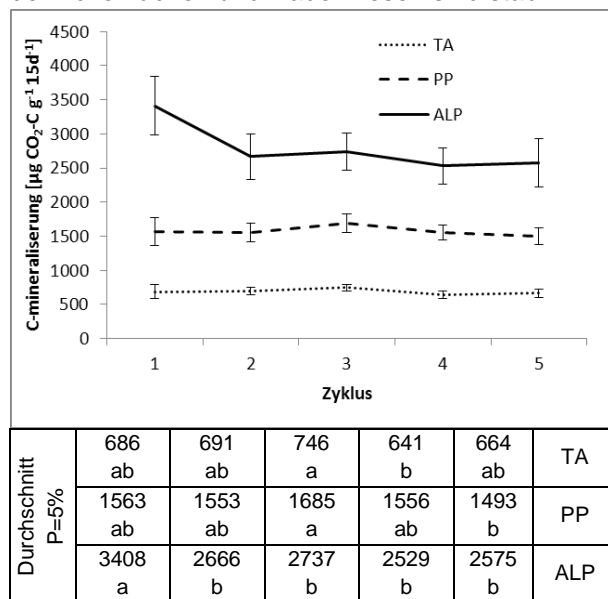


Abbildung 3.1.6 Entwicklung der Mineralisierung des organischen Kohlenstoffs.

Entwicklung pro Standort

Sieben Ackerstandorte, vier Dauerwiesen und drei Alpweiden weisen eine signifikante Abnahme ihrer Fähigkeit zur Mineralisierung des organischen Kohlenstoffs auf (Abbildung 3.1.7). Die Ursachen sind vielfältig: Fünf Standorte sind flachgründig, hydromorph oder wurden aufgeschüttet, drei Dauerwiesen sind zu Ackerflächen geworden, ein Standort ist ein Nutzgarten und drei Standorte verzeichnen zudem eine Abnahme ihres ATP-Werts.

Sechs Standorte weisen eine signifikante Zunahme auf. Es handelt sich um drei Ackerflächen, zwei Dauerwiesen und eine Alpweide. Bei drei dieser Standorte hat der Begrünungsanteil während dieser Periode zugenommen.

Beurteilung gemäss Freiburger Massstab

Der Anteil der als genügend eingestufteten Ackerflächen fluktuiert ganz leicht und hält sich um 30 Prozent (Abbildung 3.1.5). Bei den Dauerwiesen steigt der Anteil der armen Standorte seit dem dritten Zyklus an, während die sehr reichen Standorte im gleichen Zeitraum abnehmen. Die

Alpweiden verzeichnen einen steigenden Anteil an armen Standorten und eine sinkende Tendenz bei den sehr reichen Standorten.

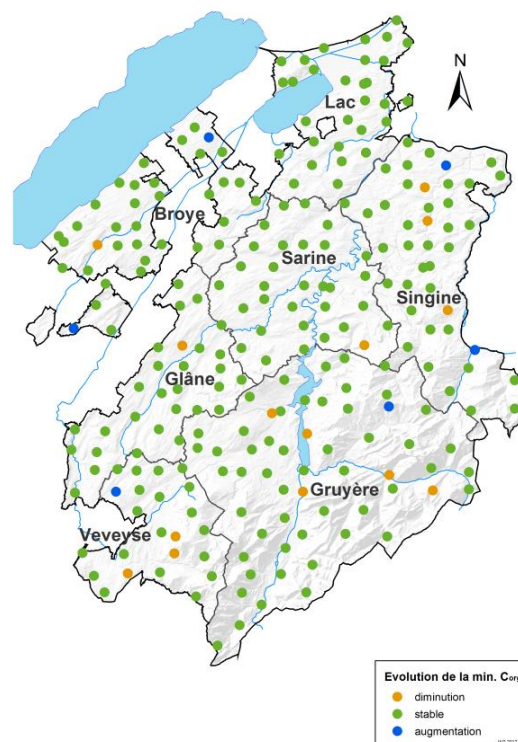


Abbildung 3.1.7 Entwicklung der Mineralisierung des organischen Kohlenstoffs pro Standort im Laufe der fünf Zyklen.

Fazit

Auch wenn die Durchschnittswerte der Mineralisierung des organischen Kohlenstoffs bei den Dauerwiesen und den Alpweiden ziemlich stabil sind, ist ein steigender Anteil armer Standorte zu beobachten. Dies zeigt – wie beim Biomasse ATP –, dass die Aktivität der mikrobiellen Flora in den Böden des Kantons Freiburg beeinträchtigt ist. Diese Feststellung bewegt uns dazu, unsere Bodenbeobachtung weiterzuführen und die verschiedenen Hypothesen, die zur Verringerung der Biomasse aufgestellt wurden, zu klären, um die Fruchtbarkeit und die Produktivität der Landwirtschaftsböden zu bewahren.

Literatur

- (1) Arbeitsgruppe Vollzug Bodenbiologie (VBB), 2009 Arbeitshilfe zur Anwendung und Interpretation bodenbiologischer Parameter. 25 S. Posieux/Bern.
- (2) Maire N., 1984. Extraction de l'adénosine triphosphate dans les sols ; une nouvelle méthode de calcul des pertes en ATP. Soil Biol. Biochem., 19, 491-500.
- (3) Rossier N. & Dessureault-Rompré J., 2003. FRIBO: Réseau d'observation des sols agricoles 1987-2001 Biologie. Landwirtschaftliches Institut des Kantons Freiburg, Station für Tierproduktion und Pflanzenbau, Grangeneuve. 98 S.
- (4) Rossier N., Von Niederhäusern A. und Bongard L., 2012. FRIBO, Réseau fribourgeois d'observation des sols 1987–2011. Landwirtschaftliches Institut des Kantons Freiburg LIG, Posieux. 200 S.

4. Forum

4.1. Bodenbiodiversität in subalpinen Auengebieten: Regenwürmer (Lumbricidae) und Springschwänze (Collembola)

Renée-Claire Le Bayon, Bullinger-Weber G., Salomé C., Zigerli D., Amstutz R., Gobat J.-M. & Guenat C.

MER Institut für Biologie, Labor Boden und Vegetation
Universität Neuenburg
Emile-Argand 11
CH-2000 Neuenburg
claire.lebayon@unine.ch
Tel. +41 32 718 23 65

Einleitung

Die Auengebiete sind Lebensräume an der Schnittstelle zwischen terrestrischen und aquatischen Ökosystemen und stellen so typische, von Schwankungen des Wasserspiegels geprägte Ökotope dar. Die fluviale Dynamik spielt folglich eine wichtige Rolle für die Geomorphologie des Lebensraums, indem der Fluss Sedimente variabler Korngrösse transportiert und gleichzeitig Sedimentations- oder Erosionsprozesse im System auslöst (Petts und Amoros, 1996). Daraus entsteht eine stark ausgeprägte räumliche Heterogenität der Landschaft, sowohl in Bezug auf das Nahrungsangebot als auch auf die Habitate der lebenden Organismen. In der Schweiz beherbergen die Auengebiete rund die Hälfte der Pflanzenarten, aber auch Fische, Amphibien, Vögel und Säugetiere, die dort die für ihre Entwicklung erforderlichen Bedingungen vorfinden können (Gallandat et al., 1993).

Seit dem Inkrafttreten der Verordnung über den Schutz der Auengebiete von nationaler Bedeutung von 1992 wurde die Biodiversität von Flora und Fauna in den fluvialen Ökosystemen eingehend studiert. Jedoch wird das Kompartiment «Boden» nur wenig beleuchtet, und nur einzelne neuere Studien haben die Wichtigkeit hervorgehoben, sich in diesen sehr dynamischen Lebensräumen auf die Auenböden, das humose Episol sowie die Bodenfauna zu konzentrieren (Zigerli, 2011; Bullinger-Weber et al., 2012). Zudem werden die subalpinen Auengebiete an der Schnittstelle zwischen Gletschervorfeldern und Schwemmebenen selten dokumentiert.

In diesem Zusammenhang zielt dieses Dokument darauf ab, eine Zusammenfassung mehrerer Studien zu bieten, die im Gasterntal (BE), durch das die Kander fliesst, durchgeführt wurden. Die Quelle der Kander ist der Kanderfirngletscher, und der Fluss mündet in den Thunersee. Der

Fokus liegt auf den Regenwurmgemeinschaften und auf den Springschwänzen, und zwar im Zusammenhang mit den verschiedenen Phytozönosen, den Humusformen und den Böden.

Material und Methoden

Forschungsstandort: Das Auengebiet Gastereholz (Gegenstand des Bundesinventars Nr. 74) liegt oberhalb von Kandersteg (BE) auf einer Höhe von 1370 m ü. M. Die Jahresdurchschnittstemperatur beträgt 5.4 °C und die durchschnittliche Jahresniederschlagssumme 1180 mm (Daten www.bafu.admin.ch). Die Kander ist ein verflochtenes Flusssystem, das sich durch einen nivalen Wasserhaushalt auszeichnet. Der mittlere Abfluss 1950–1982 betrug $2.1 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ mit durchschnittlich $5.3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ im Sommer und $0.1 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ im Winter (BAFU, 2010). Ausserdem schwanken die Tagesabflussmengen bei Sonnenscheinperioden im Sommer stark (Schneeschnelze). Die Alluvialböden sind mehrheitlich karbonatisiert.

Vegetation: Die Auswahl der Standorte für die Probenahmen gemäss den Entwicklungsstadien der Vegetation basiert auf den bereits existierenden Vegetationskarten (Gallandat et al., 1993):

- 1) Auenfläche mit Pionier-Krautvegetation (AK) auf kiesigen Alluvialflächen (*Epilobion fleischeri*) (begleitet von *Salici-Myricarietum*);
- 2) Weichholzaue (WHA) mit *Salicion eleagni* (begleitet von *Salicetum eleagno-daphnoidis*);
- 3) Grauerlenwald mit Bäumen verschiedener Altersstufen (junge (JGW) und reife Wälder (RGW)), die zum Verband *Alnion incanae* gehören (begleitet von *Calamagrostio-Alnetum incanae*).

Böden, Humusformen und Bodenfauna: Dank dem «Référéntiel pédologique» (Baize und Girard, 2009) konnten für jeden Probenahme-punkt die Kategorien von Auenböden unterschieden werden. Dazu wurde der europäische Bestimmungsschlüssel für Humusformen (Zanella et al., 2011) angewandt, und ein allgemeiner Bezug zum WRB-FAO-Schlüssel wurde hergestellt (Jabiol et al., 2013). Die Regenwürmer wurden gemäss den Techniken von Lawrence und Bowers (2002) im Frühling und im Herbst in den Zonen WHA, JGW und RGW entnommen, und ihre Art wurde bestimmt. Die Springschwänze wurden während drei Jahreszeiten in allen Gebieten in Barber-Fallen (epigäische Springschwänze) und mit Berlese-Extraktionen (endogäische Springschwänze) gesammelt und bestimmt.

Resultate und Diskussion

Auenböden: Die wenig entwickelten Böden sind insgesamt nicht sehr mächtig und erreichen aus diversen Gründen selten mehr als 50 cm. Der erste Grund besteht darin, dass die fluviale Dynamik in dieser Höhenlage und in diesem Talkessel so beschaffen ist, dass Erosion und Sedimentation sehr intensiv und häufig auftreten und dadurch das Eintreten bodenbildender Prozesse langfristig beeinträchtigen. Der zweite Grund hängt mit der biologischen Aktivität zusammen. Tatsächlich konzentrieren sich die biologischen Aktivitäten im Zusammenhang mit der Zersetzung des organischen Materials und dessen Integration in die anorganische Matrix in dieser Höhenlage und unter Berücksichtigung der langen Schneebedeckung auf rund 6 Monate pro Jahr. Die Bildung von J- oder A-Horizonten gestaltet sich folglich langsam, ebenso die Entwicklung der Böden.

An den Forschungsstandorten dominieren drei Kategorien von Auenböden *sensu stricto* (Fluvi(o)sole), die alle karbonatisiert sind:

- i) die FLUVIOSOLS BRUTS, hauptsächlich in Gebieten mit Pionier-Krautvegetation und mit einem grossen Anteil an kiesigen Alluvialflächen;
- ii) die FLUVIOSOLS JUVÉNILES, die in den WHA, JGW und RGW beobachtet werden, und schliesslich
- iii) die FLUVIOSOLS TYPIQUES, die nur in reifen Wäldern vorkommen.

So wird der Entwicklungsgradient der Böden je nach Entfernung vom Fluss und/oder der Erhebung vom Flussbett insgesamt eingehalten, auch im Zusammenhang mit der Entwicklung der Phytozönosen von den Gesellschaften mit krautiger Pioniervegetation bis zu den ältesten Grauerlen. Es ist zu beachten, dass einige REDOXISOLS und fluviale TYPISCHE REDUCTISOLS (Baize und Girard, 2009), d. h. Böden, die durch halbpermanente oder permanente Wasservorkommen geprägt sind, manchmal unter besonderen topografischen und/oder bodenkundlichen Bedingungen (feinkörnige Beschaffenheit) beobachtet werden.

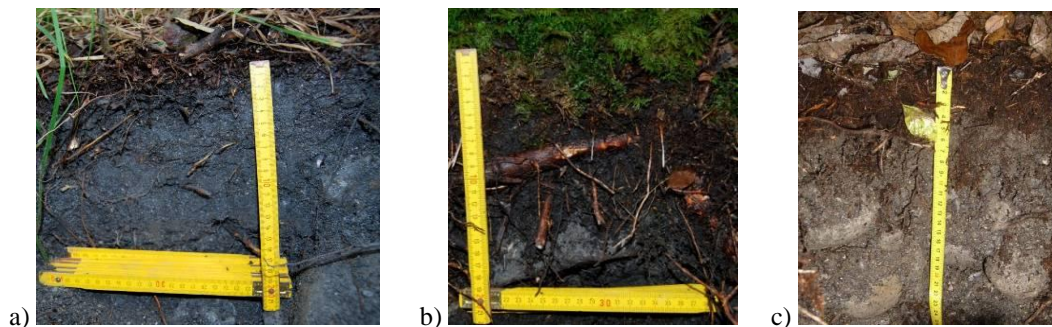


Abbildung 4.1.1 Drei Humusformen, die am Forschungsstandort erfasst wurden, und zwar in den Auenflächen mit Pionier-Krautvegetation (AK), den Weichholzaunen (WHA) und den jungen und reifen Grauerlenwäldern (JGW und RGW): a) Psammomull (AK und WHA), b) Eumesoamphi (JGW und RGW) und c) Peyromoder (JGW und RGW). Fotos: A. Widmer.

Humusformen: Zigerli (2011) beschreibt sechs Humusformen. Die meisten davon gehören zur Gruppe der «Entiformes» (Zanella et al., 2011) im Zusammenhang mit dem sandigen Substrat, auf dem sie beruhen. Die «Psammomulls» (Zanella et al., 2011) sind daher die in AK und WHA dominanten Formen mit den Horizontabfolgen des Typs diskontinuierliche OL/OFzo oder OL/OFzo in miA- und/oder meA-Taschen (Abbildung 4.1.1 a). Jedoch gilt es zu beachten, dass in vielen Fällen der A-Horizont fehlt, dafür jedoch ein Js- oder M-Horizont vorhanden ist. Die Nomenklatur von Zanella et al. (2011) ist nur schwer anwendbar, doch diejenige von Jabiol et al. (2013) ermöglicht es, die beobachtete Humusform zu benennen. In diesem bestimmten Fall handelt es sich um FLUVIC PARAHUMUS. Diese sehr neue Nomenklatur

ist in solchen Bereichen äusserst vielversprechend.

In den JGW und RGW neigen die hologanischen und organo-mineralischen Horizonte dazu, sich zu verdicken, wobei die Terroformen, hauptsächlich mit Eumesoamphi (OL/OFzo/[OH]/meA; (Abbildung 4.1.1 b)) auftreten. Lokal werden «Peyromoder» (Zanella et al., 2011) auf grobkörnigem Substrat beobachtet (Abbildung 4.1.1 c) sowie «Hydroformes» in den besonderen Fällen der vorher genannten TYPISCHEN RÉDUCTISOLS. Insgesamt hängen die Bedingungen für das Einarbeiten des organischen Materials in den Boden in dieser Höhenlage von verschiedenen Variablen ab, u. a.:

- i) von der mineralischen Beschaffenheit und der Menge der eingebrachten Streue (epigäisch

- und endogäisch), die die Entwicklung der Humusformen bedingen;
- ii) von den bodenklimatischen Bedingungen, die die biologische Aktivität stark beeinflussen (Mikroorganismen, Mikroarthropoden) und somit auch die Zersetzung der Streue und ihre Einarbeitung in den Boden; und
- iii) von der Dicke des Bodens, die sich ebenfalls auf die Vergrabung des Materials im Boden durch die Regenwürmer auswirkt, vor allem durch die anözischen Regenwürmer, deren Existenz eine minimale Bodendicke erfordert.

Bodenfauna

Regenwürmer: Auf der Grundlage der 27 Arten und Unterarten, die bisher in Auengebieten in der Schweiz erfasst wurden (Salomé et al., 2011), wurden in WHA, JGW und RGW 11 Arten beobachtet, die hauptsächlich zu den ökologischen Kategorien der endogäischen und epigäischen Arten (Tabelle 4.1.1) zählen. Im Auengebiet wurde kein einziger anözischer Regenwurm gefangen. Auf einer benachbarten Wiese, die jedoch nicht mehr zum Auengebiet gehört, wurden aber einzelne Exemplare festgestellt. Ausserdem hat Widmer (2013) in seiner Arbeit hervorgehoben, dass anözische Arten in mittelalten und in reifen Wäldern innerhalb der

subalpinen Auengebiete – ausser im Auengebiet Gastereholz – vorhanden sind. Abbildung 4.1.2 fasst die Verteilung der Regenwurmgemeinschaften auf der subalpinen Stufe anhand der Lebensraumbedingungen zusammen. Es zeigte sich, dass letztere die vorhandenen Gemeinschaften offenbar stark beeinflussen und dass die Beschaffenheit des Bodens die Variable ist, die sich auf das Vorhandensein einiger Arten auswirkt. So kann *Dendrobaena octaedra*, eine sehr kleine Art, in Taschen sehr feinkörnigen organischen Materials, das auf der Oberfläche grobkörnigen Mineralsubstrats abgelagert ist, überleben. *Lumbricus rubellus* ist hingegen relativ ubiquitär, während feine Mineralstrukturen *Aporrectodea rosea* und *Octolasion cyaneum* begünstigen.

Tabelle 4.1.1 Epigäische und endogäische Regenwurmarten, die in den WHA, JGW und RGW der subalpinen Auengebiete erfasst wurden.

Epigäische Arten	Endogäische Arten
<i>Dendrobaena octaedra</i>	<i>Aporrectodea caliginosa caliginosa</i>
<i>Dendrodrilus rubidus</i>	<i>Aporrectodea handlirschi</i>
<i>Dendrodrilus subrubicundus</i>	<i>Aporrectodea rosea</i>
<i>Lumbricus moliboeus</i>	<i>Octolasion cyaneum</i>
<i>Lumbricus rubellus</i>	<i>Octolasion tyrtaeum lacteum</i>
	<i>Octolasion tyrtaeum tyrtaeum</i>

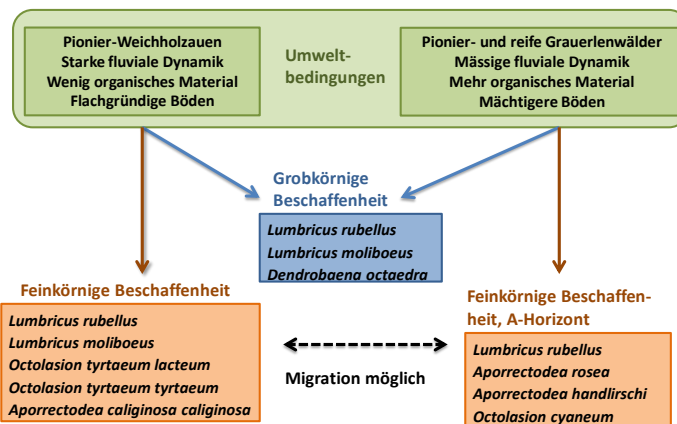


Abbildung 4.1.2 Verteilung der Regenwurmgemeinschaften aufgrund der Lebensraumbedingungen; die Variable, die das Vorhandensein der Arten bestimmt, ist die Bodenbeschaffenheit (nach Salomé, 2011).

Springschwänze

Epigäische Springschwänze: Unter den 15'200 bestimmten epigäischen Springschwänzen wurden 7 Familien und 17 Arten identifiziert. Anhand der am meisten verbreiteten epigäischen Springschwänze (Entomobryidae, Isotomidae und Tomoceridae) können AK, WHA, JGW und RGW unterschieden werden. Jedes Entwicklungsstadium der Vegetation kann anhand einer charakteristischen Kombination von Familien erkannt werden (Abbildung 4.1.3). Die Umweltfaktoren tragen zur Verteilung dieser Springschwanzfamilien bei, da die Isotomidae

z. B. von den AK und WHA abhängig sind, während die Tomoceridae sich bevorzugt in den JGW und RGW aufhalten. Es zeigte sich, dass die Fülle an Springschwanzarten ein noch präziserer Lebensraumindikator ist (Abbildung 4.1.3). Es werden 8 Arten in allen Stadien gefunden, was auf eine grosse physiologische Amplitude hindeutet. Umgekehrt überwiegen *Folsomides* in den AK, *Protaphorura* und *Vertagopus* in den WHA, *Pseudachorutes* und *Odontella* in den Stadien JGW und RGW.

In engem Zusammenhang mit den Humusformen sind drei Arten typisch: 1) *Isotomurus* in AK, das Vorhandensein dieser hygrophilen Art in einem Trockenlebensraum könnte durch die Existenz von ökologischen Nischen mit feuchtem Mikro-

klima erklärt werden; 2) *Desoria* in WHA, dabei handelt es sich um eine Ökomorphose, die von variablen mikroklimatischen Bedingungen zeugt; 3) *Pogonognathellus* in JGW und RGW, bekannt als acidophil und typisch für entwickelte Wälder.

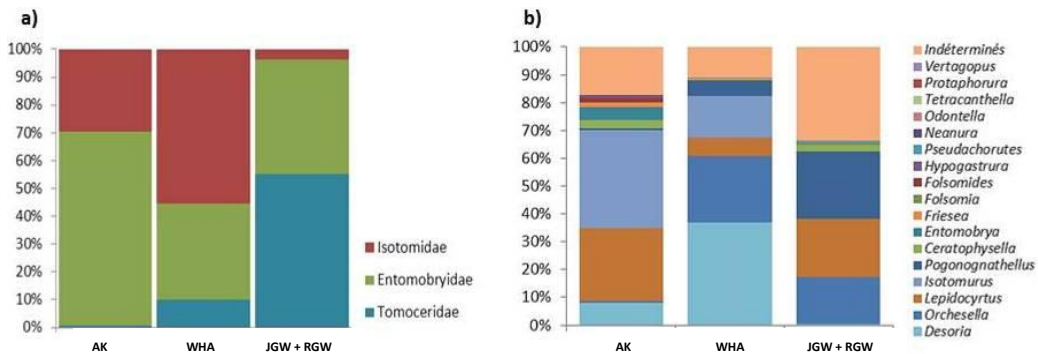


Abbildung 4.1.3 Relative Proportionen der Familien (a) und der Arten (b) der epigäischen Springschwänze in den Auenflächen mit Pionier-Krautvegetation (AK), den Weichholzauen (WHA) und den jungen und reifen Grauerlenwäldern (JGW und RGW).

Endogäische Springschwänze: Die Erlenböden beherbergen eine höhere Dichte an Springschwänzen als die anderen Lebensräume. Dies hängt sowohl mit dem Vorhandensein von holorganischen Horizonten als auch mit der feinkörnigen Beschaffenheit zusammen, die zum Speichern von Wasser beitragen – dies im Gegensatz zu den Beobachtungen in AK. Die Gemeinschaft der endogäischen Springschwänze setzt sich ebenfalls aus 17 Arten zusammen, die

sich auf 7 Familien verteilen. Mit Ausnahme der mineralischen Horizonte der Erlen herrscht in den Böden der berücksichtigten Vegetationsstadien eine starke Dominanz der Familie der Isotomidae (Abbildung 4.1.4). Diese Familie könnte also möglicherweise als gute Indikatorin für die typischen Prozesse in den Auen dienen. Die Art *Folsomia* dominiert (Abbildung 4.1.4).

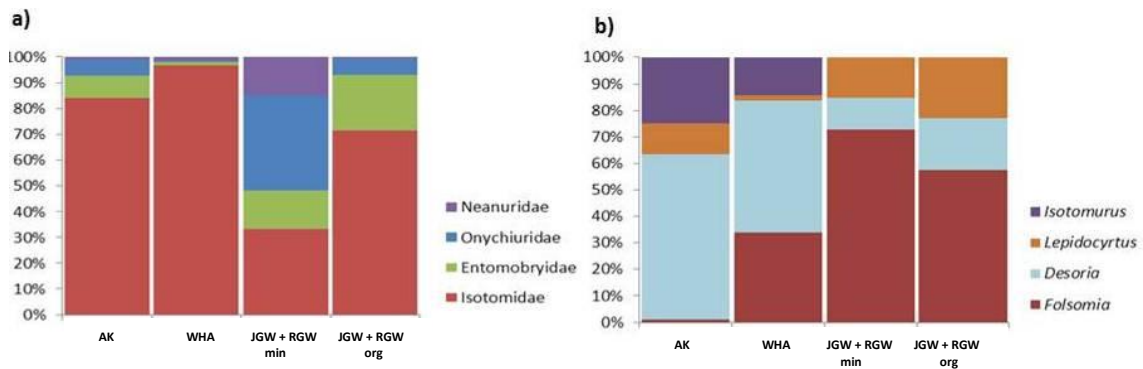


Abbildung 4.1.4 Relative Proportionen der Familien (a) und der Arten (b) der epigäischen Springschwänze in den Auenflächen mit Pionier-Krautvegetation (AK), den Weichholzauen (WHA) und den jungen und reifen Grauerlenwäldern (JGW und RGW). Die mineralischen (min) und organischen (org) Horizonte werden unterschieden.

Abbildung 4.1.5 fasst die Verteilung der Springschwanzgemeinschaften aufgrund der ökologischen und physikalisch-chemischen Lebensraummerkmale zusammen. Epigäische und endogäische Springschwänze verteilen sich entlang dem Feuchtigkeitsgradienten und je nach Gehalt an organischer Substanz, die zwei gewichtige Faktoren ihres Habitats darstellen.

Schlussfolgerungen und Ausblick

Die im Gasterntal (BE) durchgeführte holistische Studie hat es ermöglicht, eine bedeutende

Diversität auf verschiedenen räumlich-zeitlichen Organisationsstufen hervorzuheben, vom Boden über die Humusformen hin zu den Faunagemeinschaften. Diese Studie bestätigt die bereits erwähnte Funktion der Lebensraumindikatoren, die die Regenwürmer im Auengebiet haben (Bullinger-Weber et al., 2012; Salomé et al., 2011). Daher zeigt es sich über den deskriptiven und funktionalen Ansatz hinaus, dass die Springschwänze wie die Regenwürmer im Zusammenhang mit dem Entwicklungsstadium der Vegeta-

tion gute Indikatoren für die Entwicklung der Humusformen in diesem subalpinen Auengebiet sind. Der Gehalt an organischer Substanz und die Bodenbeschaffenheit sind die zwei Variablen, die die Verteilung der erforschten Faunagemeinschaften steuern. Abgesehen von den Aspekten der Biodiversität stellen Regenwürmer und Springschwänze eine grundlegende funktionale Komponente für ein besseres Verständnis der Auensysteme dar, insbesondere in dieser Höhenstufe. Diese Gruppen bringen daher neben den Hinweisen, die von der Vegetation geliefert werden, weitere Informationen auf unterschiedlichen räumlich-zeitlichen Ebenen ein. Es bleibt noch aufzuzeigen, ob diese Tendenz für verschiedene Höhenlagen verallgemeinert werden kann, in halbnatürlichen, aber auch in renaturierten Auengebieten, um die mögliche Rolle der Bodenfauna als Bioindikator für menschliche Störungen hervorzuheben.

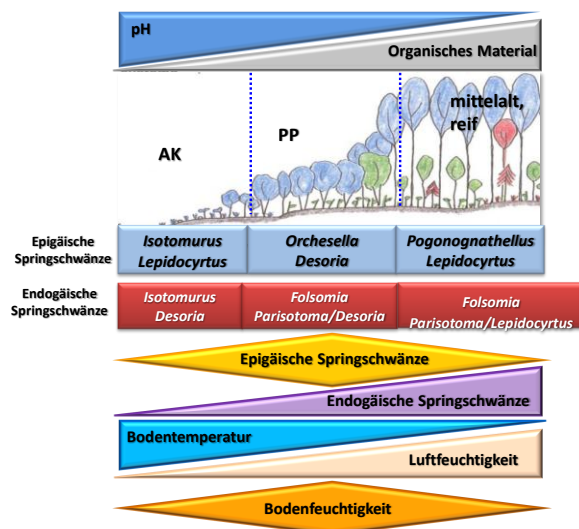


Abbildung 4.1.5 Verteilung der Gemeinschaften von *Collembola arthropleona* in den Pionier-, Postpionier-, mittelalten und reifen Gebieten aufgrund ihrer Lebensraummerkmale (nach Zigerli, 2011).

Literatur

- (1) Baize, D., Girard, M.-C., 2009. *Référentiel Pédologique 2008. Savoir faire*. Quae edition.
- (2) Bullinger-Weber, G., Guenat, C., Salomé, C., Gobat, J.-M., Le Bayon, R.-C., 2012. Impact of flood deposits on earthworm communities in alder forests from a subalpine floodplain (Kandersteg, Switzerland). *Eur J Soil Biol* 49, 5-11.
- (3) Gallandat, J.-D., Gobat, J.-M., Roulier, C., 1993. *Kartierung der Auengebiete von nationaler Bedeutung*, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern.
- (4) Guenat, C., Bureau, F., Weber, G., Toutain, F., 1999. Initial stages of soil formation in a riparian zone: Importance of biological agents and lithogenic inheritance in the development of the soil structure. *Eur J Soil Biol* 35, 153-161.
- (5) Jabiol, B., Zanella, A., Ponge, J.-F., Saffrioni, G., Englisch, M., van Delft, B., de Waal, R., Le Bayon, R.-C., 2013. A proposal for including humus forms in the World

Reference Base for Soil Resources (WRB-FAO). *Geoderma* 192, 286-294.

- (6) Lawrence, A.P., Bowers, M.A., 2002. A test of the 'hot' mustard extraction method of sampling earthworms. *Soil Biol Biochem* 34, 549-552.
- (7) Petts, G., Amoros, C., 1996. *Fluvial Hydrosystems*. Chapman & Hall, London.
- (8) Salomé, C., 2011. *Distribution des communautés lombriciennes et pédogenèse en forêts alluviales: étude le long de deux gradients écologiques*. Doctorat ès Sciences Thesis, Neuchâtel.
- (9) Salomé, C., Guenat, C., Bullinger Weber, G., Gobat, J.-M., Le Bayon, R.-C., 2011. Earthworm communities in alluvial forests: Influence of altitude, vegetation stages and soil parameters. *Pedobiologia*, 54S, 89-98.
- (10) Widmer, A., 2013. *Caractérisation des formes d'humus alluviales sous aulnaies blanches subalpines*. Master Thesis, Neuchâtel.
- (11) Zanella, A., Jabiol, B., Ponge, J.-F., 2011. A European morpho-functional classification of humus forms. *Geoderma* 164, 138-145.
- (12) Zigerli, D., 2011. *Relations entre le degré d'évolution de l'épisolum humifère et la pédofaune dans une zone alluviale subalpine (Gasterntal, BE, Suisse) - Focus sur les Collemboles*. Master Thesis, Neuchâtel.

4.2. Die karbonatisierte Biomineralisation: eine kurze Bestandsaufnahme in den Böden

Eric Verrecchia

*Labor für Biogeowissenschaften
Institut für Erdwissenschaften
Geopolis – Campus Moulins
Universität Lausanne
CH-1015 Lausanne
eric.verrecchia@unil.ch
Tel. 021 6924450*

Über das Konzept der Biomineralisation

Normalerweise wird die biologische Aktivität in den Böden als Faktor für die Strukturbildung, die Schaffung von Porosität, aber auch als Quelle und wichtiger Akteur beim Recycling der organischen Substanz selbst angesehen. Kurz zusammengefasst: Viele Aspekte betreffen selbstverständlich die Stoffkreisläufe – von der Bildung der Biomasse bis zu ihrer Zersetzung unter Bildung von Kohlendioxid. Doch Organismen und Minerale sind wesentlich enger verknüpft, als dies erscheinen mag. Die Bodenorganismen sind eine sehr wichtige Quelle von Biomineralen, insbesondere von karbonatisierten. Biominerale spielen eine massgebliche Rolle beim Aufbau zahlreicher Böden.

Der grösste Teil der karbonatisierten Biominerale besteht aus Kalzit. Da der Aragonit im kontinentalen Lebensraum sehr metastabil bleibt, betrifft er nur einige wenige Schalentiere. Es werden bei der Bildung von Biomineralen verschiedene Arten von Prozessen unterschieden. In erster Linie kann diese Bildung direkt vom Organismus vorgegeben werden. Dabei spricht man von genetisch programmierter Biomineralisation. Dies ist zum Beispiel bei den Schalen von Weichtieren oder bei den Stielen und Oogonien von Armleuchteralgen und natürlich bei Skeletten und Gehäusen der Fall. Fehlt eine spezifische genetische Programmierung, kann die Biomineralisation entweder vom Organismus induziert oder beeinflusst sein. Falls der Organismus eine direkte Rolle beim Abscheiden von Karbonat durch seinen Stoffwechsel spielt, ist die Biomineralisation induziert. Dient er jedoch nur als Katalysator für die Abscheidung, weil gewisse Makromoleküle oder lebensraumbedingte Veränderungen vorhanden sind, ist die Biomineralisation als vom Organismus beeinflusst zu betrachten.

In jedem Fall besteht bei der nicht programmierten Biomineralisation eine direkte (oder indirekte) Verbindung der Karbonatabscheidung im Zusammenhang mit Bodenorganismen zu den

Karbonatgleichgewichten, und folglich u. a. auch zu den Bedingungen des CO₂-Partialdrucks. Auch wenn die Biominerale sich in spezialisierten Zellen bilden, manchmal mit der Hilfe von spezifischen Proteinen oder unter dem direkten Einfluss einer Stoffwechselaktivität, bleiben die physikalisch-chemischen Bedingungen im Zusammenhang mit den Karbonatgleichgewichten unbestritten.

Welches sind also die Akteure, die zur Bildung von karbonatisierten Biomineralen in den Böden beitragen? Tatsächlich stammen sie aus allen fünf Teilreichen der Lebewesen: Tiere, Pflanzen, Pilze, Bakterien und, eher ausnahmsweise, Protisten.

Fauna: Schalen, Konstruktionen und Biosphäroiden

Die Schalen bilden die am leichtesten zu beobachtende Kategorie, die zu den Biomineralen im Boden beiträgt. Teile von Schalen, insbesondere von Gastropoden oder Vögeln, können leicht identifiziert werden, sei es makroskopisch, mit der Lupe oder unter dem Mikroskop. Sie sind anhand ihrer kristallinen Struktur, die in lamellen- und/oder prismenartigen Schichten angeordnet ist, erkennbar und tragen wesentlich zur Kalziumkarbonatzufuhr bei, insbesondere in kalkarmen Gebieten sowie in gewissen tropischen Küstenböden. Es werden manchmal einige Millimeter grosse Biomineralisationen beobachtet, die eine subelliptische Form mit subparallelen Kristallen aufweisen, die mitunter in konzentrischen Schichten angeordnet sind. Diese werden bisweilen den Schalen der Gastropoden zugeschrieben. Bei diesen Objekten handelt es sich um Opercula, Schalendeckel, die Schnecken vor dem Rückzug in die Winterstarre bilden.

Auch die Insekten tragen zur Bildung von karbonatisierten Ablagerungen in den Böden bei, seien es Hautflügler, Käfer (Coleoptera) oder Termiten (Isoptera). Hautflügler und Käfer bauen eine Art Nester, die durch einen doppelten Prozess der induzierten Biomineralisation mit Kalziumkarbonat verstärkt werden: die Partikelaggregation und die Verfestigung der Partikel durch Ausscheidungen, die auch als Orte der Nukleation für den sekundären Kalzit dienen (z. B. bei einigen Bienen und bei Scarabaeoidea). Es ist schon lange bekannt, dass die Isoptera (Termiten) Kalziumkarbonat im Boden ausscheiden können. Da in ihrem Darm extrem alkalische Bedingungen herrschen (mit einem pH von rund 10; Köhler et al., 2012), können die Termiten Kalziumkarbonat direkt in ihrem Organismus, in ihren Exkrementen und ihren diversen Abfallprodukten abscheiden.

Ausserdem können bei bestimmten Termitenhügeln sekundäre Ablagerungen von Kalziumkarbonat beobachtet werden, die das Problem ihres direkten (induzierte Biomineralisation) oder indirekten Einflusses (beeinflusste Biomineralisation) hervorheben, und zwar aufgrund der chemischen Auswirkungen, die diese Insekten induzieren, indem sie die lokalen edaphischen Bedingungen verändern. Jedenfalls kann die Ablagerung von Kalziumkarbonat bei einem einzigen Termitenhügel 9 Tonnen betragen (Mujinya et al, 2011), was die Bedingungen des betroffenen tropischen Bodens drastisch verändert.

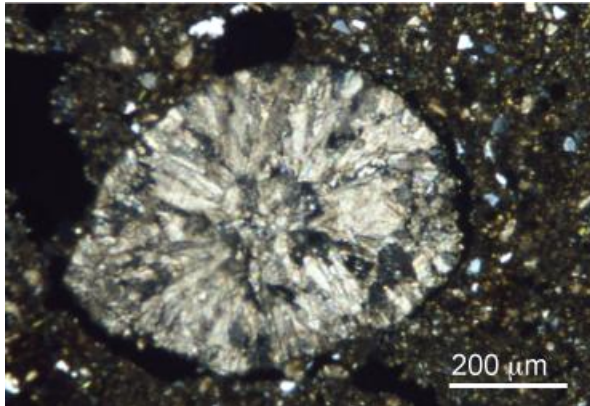


Abbildung 4.2.1 Beispiel eines Bio-Sphäroids eines Regenwurms in einem Auenterrassenboden. Analysiertes, polarisiertes Licht.

Schliesslich tragen die Regenwürmer durch die Produktion von Biosphäroiden ebenfalls zur karbonatisierten Biomineralisation bei. Diese auf dem Objektträger einfach zu erkennenden Objekte (Abbildung 4.2.1) werden von den Kalkdrüsen der Regenwürmer erzeugt und im Wurmhumus ausgeschieden. Die Produktion kann in gewissen Böden 4.3 mg CaCO_3 pro Regenwurm und Tag erreichen mit einem Ertrag von 20 bis 3000 mol CaCO_3 pro ha und Jahr (Lambkin et al., 2011). Einige Nacktschnecken (Arionoidea) produzieren Kalkkörner, die den Biosphäroiden von Regenwürmern ähneln, deren innere Struktur und Form jedoch unterschiedlich sind. Schliesslich enthalten einige Fäzes und Exkrememente von Tieren (z. B. von Schafen) kleine radiallyfaserige Sphärolithen aus Oxalat und Kalziumkarbonat, die im Boden abgelagert werden. Sie dienen in archäologischen Böden häufig als Marker für Viehzucht (Canti, 1999).

Pflanzlich ... und mineralisch

Eine der ersten pflanzenbezogenen Formen der karbonatisierten Biomineralisation stellt die breite Kategorie der Rhizolithen dar. Rhizolithen, ein Begriff aus der Geologie, sind Spuren von versteinerten Wurzeln. Sie treten in mehreren Formen auf: Die Wurzel hat sich entweder zer-

setzt, und es ist nur noch die verhärtete Karbonathülse vorhanden, oder sie hat sich mineralisiert und – wie bei versteinertem Holz – so ihre gesamte Struktur konserviert. Die Karbonathülsen gehen auf den Einfluss der ersten terrestrischen Pflanzen zurück. Heutzutage sind sie häufig anzutreffen in karbonatisierten Böden auf Sand sowie in den Dünenböden des Mittelmeerraums. Dank der Fähigkeit der Pflanze, Bodenlösungen aufzusaugen, konzentriert sie diese, bis es zur Bildung von Kristallkeimen kommt. Im Allgemeinen sind die peri-rhizosphärischen Lösungen gegenüber dem Kalzit ziemlich stark gesättigt, da hauptsächlich sehr feine Ablagerungen (Mikrite) beobachtet werden, die für eine Vielzahl von Nukleationsorten sprechen. Rhizolithe werden in der geologischen Literatur über Paläoböden häufig als Zeugen pflanzlicher Aktivität verwendet. Im Zusammenhang mit der Rhizosphäre werden nicht selten mit Kalzit mineralisierte Wurzelhaare festgestellt. In einem solchen Fall wurde nur der äussere Teil der Wurzel mit seinen haarförmigen Zellen durch Pseudomorphosen von Kalzitkristallen ersetzt.

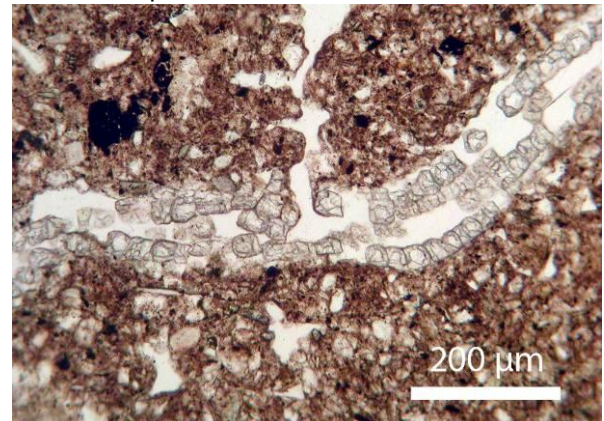


Abbildung 4.2.2 Beispiel von kalzifizierten Wurzelzellen in einem Braunerdeboden auf Löss. Polarisiertes Licht.

Ist im Boden eine zu hohe Verfügbarkeit von gelöstem Kalzium vorhanden, das von der Wurzel aufgenommen werden kann, z. B. an der Toxizitätsschwelle einer Chlorose, nutzen einige Pflanzen das Vakuum, um diese Kalziumtoxizität zu hemmen, indem sie die inerte Abscheidung von Kalziumkarbonat bewirken. Das Kalzitmonokristall kann so in den Vakuolen wachsen, bis es die Zelle vollständig ausfüllt und die Form der Wurzelzellen abbildet. Es handelt sich hierbei um CRC (auf Englisch «*calcified root cells*») oder kalzifizierte Wurzelzellen (Abbildung 4.2.2). In einigen Böden, insbesondere im Mittelmeerraum, können CRC so häufig vorkommen, dass sie zytomorphen Sand bilden und so die Beschaffenheit und die physikalisch-chemischen Parameter des Bodens verändern. Zum Abschluss dieses

Abschnitts über das Pflanzenreich sei die Fähigkeit einiger Gräser erwähnt, in ihrem Gewebe kleine Sphärolithen abzuscheiden. Diese bestehen häufig aus Oxalaten, manchmal aus Kalziumkarbonat, aber je nachdem auch aus amorphem Silizium. Diese besonderen Kristalle werden im Allgemeinen Phytolithen genannt.

Die grundlegende Rolle der Pilze

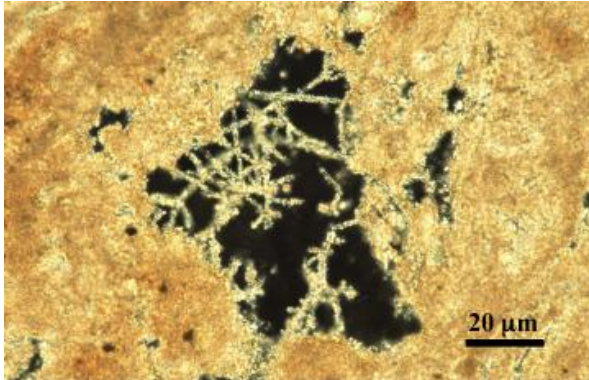


Abbildung 4.2.3 Beispiel von kalzifizierten Pilzfilamenten. Wahrscheinlich sind einige davon mit Kalziumoxalat und nicht mit Kalziumkarbonat überzogen. Karbonatisierter Boden auf Kreide. Analysiertes, polarisiertes Licht.

Pilze spielen in den Böden eine äusserst wichtige Rolle. Sie zersetzen, helfen bei der Strukturierung von Aggregaten, translozieren Elemente und sind ebenfalls in der Lage, karbonatisierte Biomineralisation durchzuführen. Die Pilze sind vor allem bekannt wegen ihrer Fähigkeit, Oxalate jeder Art abzuscheiden (Ca, aber auch Mg, Sr, Mn, Co, Cd, Cu, Fe oder Zn; Gadd, 1999). Gewisse Pilze kalzifizieren sich und bilden dabei, was die Geologen als *kalzifizierte Filamente* bezeichnen (auf Englisch «*calcified filaments*»; Abbildung 4.2.3.) Obwohl einige dieser Filamente offenbar tatsächlich Karbonatisierungen zugeordnet werden können, wurden in der Literatur einige davon mit Oxalatmineralisationen verwechselt.

Was weit spektakulärer und mit blossem Auge erkennbar ist, ist, dass Pilze bestimmte Kalzitkristalle in sehr grossen Mengen abscheiden können, und zwar in bestimmten Böden, z. B. in den kalkhaltigen Böden des Juras auf Karbonat-Kryoklast («Grèzes») oder Kryoklasten (Abbildung 4.2.4). Diese Ablagerungen bilden weisse, manchmal verhärtete karbonatisierte Bänder in Form von Bca oder Cca. Diese karbonatisierte Substanz ist hauptsächlich aus Millionen von *nadelförmigen Kalzitkristallen* oder NFC aufgebaut (auf Englisch «*Needle Fibre Calcite*»).



Abbildung 4.2.4 Typisches Beispiel eines Bodens auf Kryoklasten, in dem die tiefen Horizonte vollständig von Kalzit, das von Pilzen abgelagert wurde, durchdrungen sind (weisslicher Horizont). Die Oberflächenebenen sind sehr humos, während die Tiefenhorizonte grobkörnig und hauptsächlich mineralisch sind. Karbonatisierter Boden im Schweizer Jura, Kanton Neuenburg.

Die Herkunft und die biogeochemische Charakterisierung des nadelförmigen Kalzits wurden neulich in Studien thematisiert, die nicht nur die direkten Auswirkungen der Biomineralisation durch Pilze (Bindschedler et al., 2010, 2012), sondern auch die Auswirkungen dieser Biominerale auf den gekoppelten Kreislauf von Kohlenstoff und Kalzium im Boden aufzeigen, wobei der Kohlenstoff mehrheitlich im Zusammenhang mit der Bodenatmung entsteht (Millière et al., 2011). Der nadelförmige Kalzit umfasst zahlreiche Ausprägungen und zeigt sich in diversen Formen (Abbildung 4.2.5), die alle genetisch in Verbindung mit dem Einfluss der Pilze stehen. Der nadelförmige Kalzit bildet sich in Rhizomorphensträngen, wenn für die Nukleation in den Strukturen der Mikrotubuli der Hyphen und deren Translokationsfähigkeit günstige Bedingungen herrschen.

Die Pilze greifen also direkt in den Kalziumkarbonat-Kreislauf des Bodens ein. Durch ihre Fähigkeit, den Lebensraum zu erkunden und Kationen zu verbreiten, z. B. diejenigen des Kalziums, induzieren die Pilze in ihren Strängen eine Biomineralisation, indem sie den Kalzit mit Hilfe von Kalzium und karbonatisierten Ionen aus der Bodenlösung nukleieren. Die Pilze scheinen den Kohlenstoff nicht aufzuspalten, da sie effektiv nicht die anorganischen karbonatisierten Arten, sondern die organischen Kohlenstoffquellen

metabolisieren. Der nadelförmige Kalzit trägt folglich die geochemische Signatur des anorganischen Kohlenstoffs, gelöst in der Bodenlösung, und daher hauptsächlich diejenige des Kohlendioxids, das aus der Atmung entsteht.

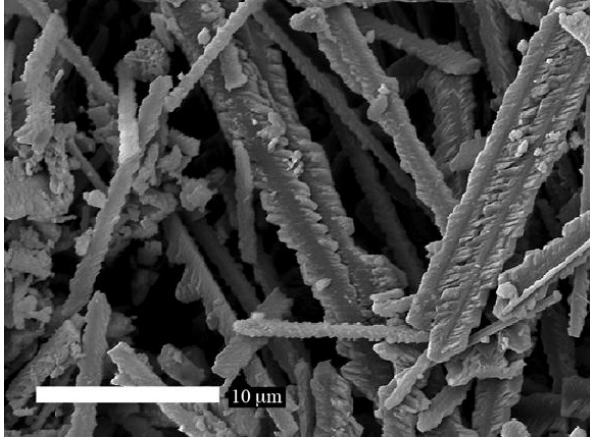


Abbildung 4.2.5 Beispiel eines nadelförmigen Kalzits unter dem Rasterelektronenmikroskop. Stichproben aus einem karbonatisierten Boden im Schweizer Jura, Kanton Neuenburg.

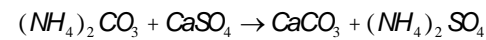
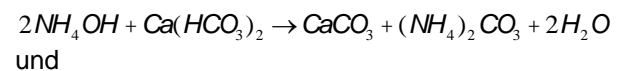
Die Bakterien: eine zweiseitige Rolle in der Biomineralisation

Bisher wurde die direkte Beteiligung von Bakterien bei der Abscheidung von Kalziumkarbonat durch programmierte Biomineralisation in Böden nicht nachgewiesen. Doch die Rolle der Bakterien bei der Veränderung der lokalen edaphischen Bedingungen ist unbestritten. Diese basiert auf zwei Arten des Einflusses auf die Kristallisation: die besonderen Stoffwechselaktivitäten einerseits und die Bildung spezifischer Ablagerungen andererseits, die aus exopolymeren Substanzen oder EPS bestehen (einige Pilze sind ebenfalls in der Lage, solche EPS zu bilden).

So scheinen die Mechanismen zur CO₂-Assimilation durch Bakterien mit denjenigen der intrazellulären pH-Regulierung, und somit mit dem Ionenaustausch, verbunden zu sein, die ihrerseits von der Assimilation von Bikarbonat und Kalzium abhängig sind. Offenbar ist die Abscheidung von Kalziumkarbonat häufig eine Reaktion von heterotrophen Bakteriengemeinschaften auf eine Anreicherung der Umwelt mit organischer Substanz.

In der anaeroben Atmung kann die Oxidation organischen Materials ebenfalls die Abscheidung von CaCO₃ induzieren. Ein Extremfall ist die Produktion von biogenem Methan in der Tiefe durch methanogene Bakterien, die gelöstes organisches Material von der Oberfläche in CO₂ und CH₄ umwandeln. Diese Umwandlung kann unter Böden, die sehr reich an organischem Material sind, oder unter Torfböden stattfinden, falls phreatische und rein anoxische Bedingungen

herrschen. Sekundäres Kalziumkarbonat kann also in Felsspalten abgeschieden werden, wobei die organische Laminarstruktur der Bakterienkolonien beibehalten wird (Lauriol und Clark, 1999). Die Reduktion von Nitraten und Sulfaten durch heterotrophe Bakterien führt ebenfalls zur Produktion von CaCO₃. Die Aktivität der Bakterien kann in Kalziumsulfat-reichen Böden (Gips), in denen sich zudem Eisenionen befinden, zur parallelen Ausscheidung von Kalziumkarbonat und Eisensulfid führen. Ein weiterer Prozess, der demjenigen der Sulfatreduktion ähnelt, läuft bei der oxidativen Desaminierung von Aminosäuren sowohl durch aerobe als auch durch anaerobe Bakterien ab:



Das Ergebnis ist wiederum die Bildung von karbonatisierten Ablagerungen.

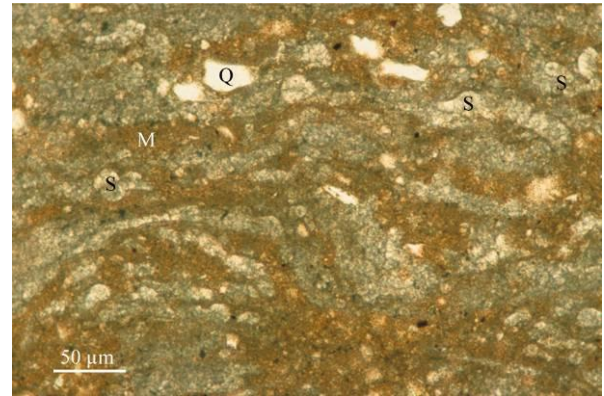


Abbildung 4.2.6 Beispiel von Kalzitsphärolithen, die Cyanobakterienteppichen zugeordnet werden. Q: Quarz, S: Sphärolithen, M: feine Ablagerungen von Ton und Karbonat (Mikrit). Boden mit karbonatisierter Verkrustung, Israel. Polarisiertes Licht.

Schliesslich scheint die chemische Beschaffenheit der Bakterienzellwände die Kalzitnukleation zu erleichtern, insbesondere durch das Vorhandensein bestimmter Aminosäuren und spezifischer Gruppen, z. B. Carboxygruppen (Braissant et al., 2003). Die Sphäroidform wird häufig mit den Kristallen assoziiert, die sich in diesen Bakterienfilmen finden. In karbonatisierten Wüstenböden, die von Mikrobenteppichen beeinflusst werden, werden häufig verhärtete Horizonte festgestellt. Diese bestehen aus unzähligen kleinen Sphärolithen (Abbildung 4.2.6) und werden Teppichen von Cyanobakterien zugeordnet. In diesem Fall resultiert die Imprägnierung der Cyanobakterien-EPS durch CaCO₃ aus folgenden biogeochemischen Prozessen: 1) Assimilation von HCO₃⁻-Ionen als Kohlenstoffquelle für die Photosynthese in einem ruhigen und CO₂-armen Umfeld; 2) Ausscheidung von OH⁻-Ionen in den

Strängen und Bildung eines Alkalitätsgradienten, 3) zugunsten dieser Gradienten Kombination von Ca^{2+} - und CO_3^{2-} -Ionen in den Strängen; und schliesslich 4) Ausscheidung von Kalzitkristallen (CaCO_3).

Sämtliche dieser Prozesse berücksichtigen insbesondere die enge Interaktion zwischen Mikroben, Stoffwechselwegen und Boden. Die Bakterien stellen zwar den Motor für die Ausscheidung dar, jedoch über externe Wege zur Veränderung des Lebensraums.

Wenn ein ganzes Ökosystem zur karbonatisierten Biomineralisation beiträgt: der Oxalat-Karbonat-Pfad

In den Tropen, wo die edaphischen Bedingungen eigentlich jegliche kalkartige Ablagerung verhindern müssten, braucht es für die Ausscheidung von Kalziumkarbonat alle Akteure – Pflanzen, Pilze und Bakterien. Hier kommt der Oxalat-Karbonat-Pfad zum Tragen. Einige Bäume der innertropischen Zone produzieren bei ihrer Photosynthese grosse Mengen an Kalziumoxalat. Bei der Zersetzung des Holzes von Stamm und/oder Wurzeln werden die Oxalatkristalle im Boden freigesetzt. Zu dieser Freisetzung tragen einige erdbewohnende Termitenarten bei. Auch einige Pilze, die für die Degradierung des Waldes verantwortlich sind, produzieren grosse Mengen an Kalziumoxalat und unterstützen so die Ansammlung dieses organischen Salzes. Diese Kristalle sind zwar sehr stabil und lösen sich unter Oberflächenbedingungen nur sehr schlecht auf, aber es gibt im Boden Bakterien, die Oxalatsalze sowohl als Kohlenstoff- als auch als Elektronenquelle nutzen. Diese Bakterien werden oxalotroph genannt. Sie können mit oder ohne Hilfe der Pilze (Martin et al., 2012) die im Boden vorhandenen Kristalle nutzen. Bei Oxalotrophie alkalisieren die Bakterien den Lebensraum stark, indem sie den pH der Böden von 4.7 auf über 8.5 anheben. Oxalotrophie führt ebenfalls dazu, dass Hydrogenkarbonationen freigesetzt werden, die sich bei alkalischen pH-Werten in Karbonat aufspalten. Bei Vorhandensein von Kalzium in der Bodenlösung sowie während der Konzentrationsphasen der Lösungen können die Karbonate folglich im Boden in Form von Kalk ausgeschieden werden (Verrecchia et al., 2006).

Der Boden in Abbildung 4.2.7 weist keine Merkmale eines Ferralsols mehr auf: Obwohl die Quarze aufgrund ihrer schwachen Alterabilität bewahrt bleiben, finden sich nur Spuren von Eisenoxiden, während die Matrix vollständig karbonatisiert ist und sich aus feinen mikritischen Karbonaten zusammensetzt. Sekundäre Zemente

pedogenen Ursprungs (Mikrosparite) verhärteten die Akkumulationsbereiche. Diese Böden, die mit dem Oxalat-Karbonat-Pfad und dessen Akteuren assoziiert werden, stellen folglich Ökosysteme im eigentlichen Sinne des Wortes dar und ihre biogeochemischen Merkmale machen daraus typische Kohlenstoffsinken (Cailleau et al., 2011).

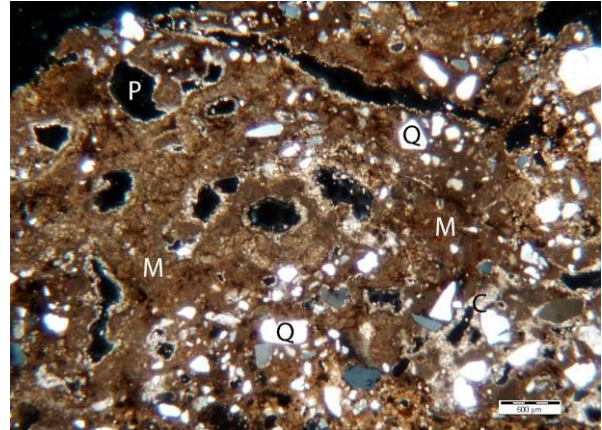


Abbildung 4.2.7 Auswirkungen des Oxalat-Karbonat-Pfads auf die tropischen Böden. Q: Quarz, P: Poren, M: feine Ton-, Eisenoxid- und Karbonatablagerungen (Mikrit), C: pedogene Kalzitkristalle. Karbonatisierter Boden in ferralitischem Umfeld (!), Republik Côte d'Ivoire. Analysiertes, polarisiertes Licht.

Fazit

Die Prozesse der Interaktion zwischen Organismen und Mineralen sind sehr vielfältig, wenn man die Biogeochemie des Kalziumkarbonats in den Böden betrachtet. Pflanzen, Mikroorganismen, Tiere – alle haben die Fähigkeit, karbonatisierte Biominerale zu produzieren und folglich die physikalisch-chemischen Bedingungen der Böden zu verändern. Das Erforschen dieser Interaktionen beweist, wie schwierig es ist, Organismen und Minerale bei der Entwicklung der Erdoberfläche zu trennen. Diese Interaktionen unterstreichen einmal mehr, dass die Böden emergierende Eigenschaften des Zusammenstreffens von Organismen und Mineralen in den Oberflächenbedingungen eines einzigartigen Planeten darstellen.

Danksagung

Einige der vorgestellten Ergebnisse (nadelförmiger Kalzit und Oxalat-Karbonat-Pfad) sind das Resultat einer Gruppenarbeit. Mein herzlicher Dank gilt Prof. P. Junier und Prof. M. Aragno (Unine), Dr. S. Bindschedler, Dr. G. Cailleau, Dr. M. Guggiari, L. Millière (Unil) sowie Dr. O. Braissant (Unibas), Dr. D. Job (Unine) und G. Martin (MSc Unil-Unine). Dieser Beitrag wurde während eines akademischen Aufenthalts an der Università degli Studi di Milano verfasst, ermöglicht durch die Unterstützung der Stiftung Herbette der Universität Lausanne.

Literatur

- (1) Bindschedler, S., Millière, L., Cailleau, G., Job, D., Verrecchia, E.P. (2010): Calcitic nanofibres in soils and caves: a putative fungal contribution to carbonato-

- genesis. *Geological Society, London, Special Publications* 336, 225-238.
- (2) Braissant O, Cailleau G, Dupraz C, Verrecchia EP (2003) Bacterially induced mineralization of calcium carbonate in terrestrial environments: the role of exopolysaccharides and amino acids. *J Sedim Res* 73:485-490
 - (3) Cailleau, G., Braissant, O., and Verrecchia, E.P. (2011) Turning sunlight into stone: the oxalate-carbonate pathway in a tropical tree ecosystem. *Biogeosci* 8: 1755-1767.
 - (4) Canti, M.G., 1999. The production and preservation of faecal spherulites: animals, environment and taphonomy. *J. Arch. Sci.* 26, 251-258.
 - (5) Gadd, G.M., Poole, R.K. (1999): Fungal Production of Citric and Oxalic Acid: Importance in Metal Speciation, Physiology and Biogeochemical Processes. In: *Advances in Microbial Physiology*. pp 47-92. Academic Press.
 - (6) Köhler, T., Dietrich, C., Scheffrahn, R.H., Brune, A. (2012): High-resolution analysis of gut environment and bacterial microbiota reveals functional compartmentation of the gut in wood-feeding higher termites (*Nasutitermes* spp.). *Appl Environ Microbiol* 78, 4691-4701.
 - (7) Lambkin, D.C., Gwilliam, K.H., Layton, C., Canti, M.G., Pearce, T.G., Hodson, M.E. (2012): Soil pH governs production rate of calcium carbonate secreted by the earthworm *Lumbricus terrestris*. *Appl Geochem* 26, Supplement, S64-S66.
 - (8) Lauriol, B., Clark, I. (1999): Fissure calcretes in the arctic: a paleohydrologic indicator. *Appl Geochem* 14, 775-785.
 - (9) Martin, G., Guggiari, M., Bravo, D., Zopfi, J., Cailleau, G., Aragno, M., Job, D., Verrecchia, E., Junier, P. (2012): Fungi, bacteria and soil pH: the oxalate-carbonate pathway as a model for metabolic interaction. *Environ Microbiol* 14, 2960-2970.
 - (10) Milliere, L., Hasinger, O., Bindschedler, S., Cailleau, G., Spangenberg, J.E., Verrecchia, E.P. (2011): Stable carbon and oxygen isotope signatures of pedogenic needle fibre calcite. *Geoderma* 161, 74-87.
 - (11) Mujinya, B.B., Mees, F., Boeckx, P., Bodé, S., Baert, G., Erens, H., Delefortrie, S., Verdoodt, A., Ngongo, M., Van Ranst, E. (2011): The origin of carbonates in termite mounds of the Lubumbashi area, D.R. Congo. *Geoderma* 165, 95-105.
 - (12) Verrecchia, EP, Braissant, O and Cailleau, G. 2006. The oxalate-carbonate pathway in soil carbon storage: the role of fungi and oxalotrophic bacteria. In: *Fungi in Biogeochemical Cycles*, Gadd, G M. (ed.) 289-310. Cambridge: Cambridge University Press.

Impressum VBB-Bulletin Nr. 15/2013

Herausgeberin

VBB (Arbeitsgruppe «Vollzug Bodenbiologie»)

Die kantonalen Bodenschutzfachstellen und das Bundesamt für Umwelt (BAFU) haben die Arbeitsgruppe VBB 1995 gegründet. Diese widmet sich Fragen zur Bodenbiologie im Hinblick auf den Vollzug des Bodenschutzes und die Erhaltung der Bodenfruchtbarkeit nach der Verordnung über die Belastung des Bodens (VBBö).

Vorsitzende seit 2012

Claudia Maurer-Troxler

Amt für Landwirtschaft und Natur des Kantons Bern – Fachstelle Bodenschutz

Rütti

3052 Zollikofen

Tel. 031 910 53 33

E-Mail: claudia.maurer@vol.be.ch

Sekretariat und Bezug

Dr. Paul Mäder

Forschungsinstitut für biologischen Landbau (FiBL)

Ackerstrasse

CH-5070 Frick

Tel. 062 865 72 32

Fax. 062 865 72 73

E-Mail: paul.maeder@fibl.org

Das Bulletin ist auch auf Internet verfügbar:

<http://www.bafu.admin.ch/bodenschutz/> >
> Schwerpunkte > Bodenbiologie