



## Der Bodenkrümel

Urs VÖKT, Bodenschutzfachstelle des Kantons Bern, Gesellschaftsstrasse 78, CH-3012 Bern

Gerhard HASINGER, Forschungsinstitut für biologischen Landbau, CH-4104 Oberwil

Franz BORER, Amt für Umweltschutz, CH-4500 Solothurn

Peter SCHOCH (Abbildung), Stalden 35, CH-4500 Solothurn

### Zusammenfassung

Böden sind das tragende Element von Landökosystemen. Nur mit einer intakten Struktur können sie ihre Funktionen erfüllen. Der Krümel ist das Bauelement dieser intakten Struktur. Es ist das Resultat eines Jahrtausende dauernden Bodenbildungsprozesses bei dem die Bodenlebewesen eine herausragende Stellung einnehmen. Heute können an Böden zunehmend Erosion, Verschlammung und Verdichtung als Anzeichen einer geschwächten Krümelstruktur beobachtet werden.

### Der Krümel als Ergebnis der Tätigkeit der Bodenorganismen

Die Krümelstruktur ist das Ergebnis von Prozessen, welche bereits seit Jahrtausenden zur Bodenbildung beitragen. Dabei wirken alle Bodenlebewesen durch ihre Lebensweise auf die Krümelbildung ein. Ein frisch gebildeter Boden wird durch Lebewesen besiedelt. Neben zahlreichen Mikroorganismen (Bakterien, Pilze, Algen) wachsen auch Pflanzen auf dieser noch wenig fruchtbaren und nicht struktu-

rierten Oberfläche. Die Pflanzenwurzeln scheiden Stoffe aus, welche die Bodenbestandteile (Feinsand, Schluff und Ton) miteinander verkleben. Dadurch werden die Wurzelröhren stabilisiert. Fehlt diese Stabilisierung, werden die Feinwurzeln bei Regen durch feinste kolloidale Bodenbestandteile verschlämmt. Das kann zum Absterben von ganzen Wurzelbereichen führen.

Durch die allmählich dichtere Besiedlung mit Pflanzen wird der Oberboden nach und nach mit organischer Substanz angereichert. Jetzt können auch grössere Bodenlebewesen den Boden besiedeln. Vorab der Regenwurm nimmt bei der Nahrungsaufnahme auch Feinerdeteilchen in seinen Verdauungstrakt auf, wo sie mit organischer Substanz innig vermischt werden. Es entstehen die sogenannten Ton-Humuskomplexe, welche sehr stabil sind.

Die Regenwurmhäufchen (Bodenaggregate) werden an der Bodenoberfläche ausgeschieden und zeichnen sich durch eine gute Kohärenz (innere Stabilität) aus. Begünstigt durch den hohen Sauerstoffgehalt werden diese Häufchen rasch von Bakterien, Pilzen und Algen besiedelt. Es finden an der Oberfläche beschleunigte Abbauprozesse statt. Dadurch reichert sich dort schwer abbaubare organische Substanz an. Dieser Prozess führt zur Bil-

dung einer Humushülle. Die organische Substanz wirkt als Trennschicht zwischen den Wurmhäufchen. Das wiederum verhindert das Verkleben der Aggregate untereinander. Wenn diese Wurmhäufchen in den Boden eingearbeitet werden, bleiben sie mehr oder weniger als Einheit erhalten. Durch weitere Besiedlung mit Bodenlebewesen (siehe Abb. 1) wird diese Humushülle stabilisiert und auch regeneriert.

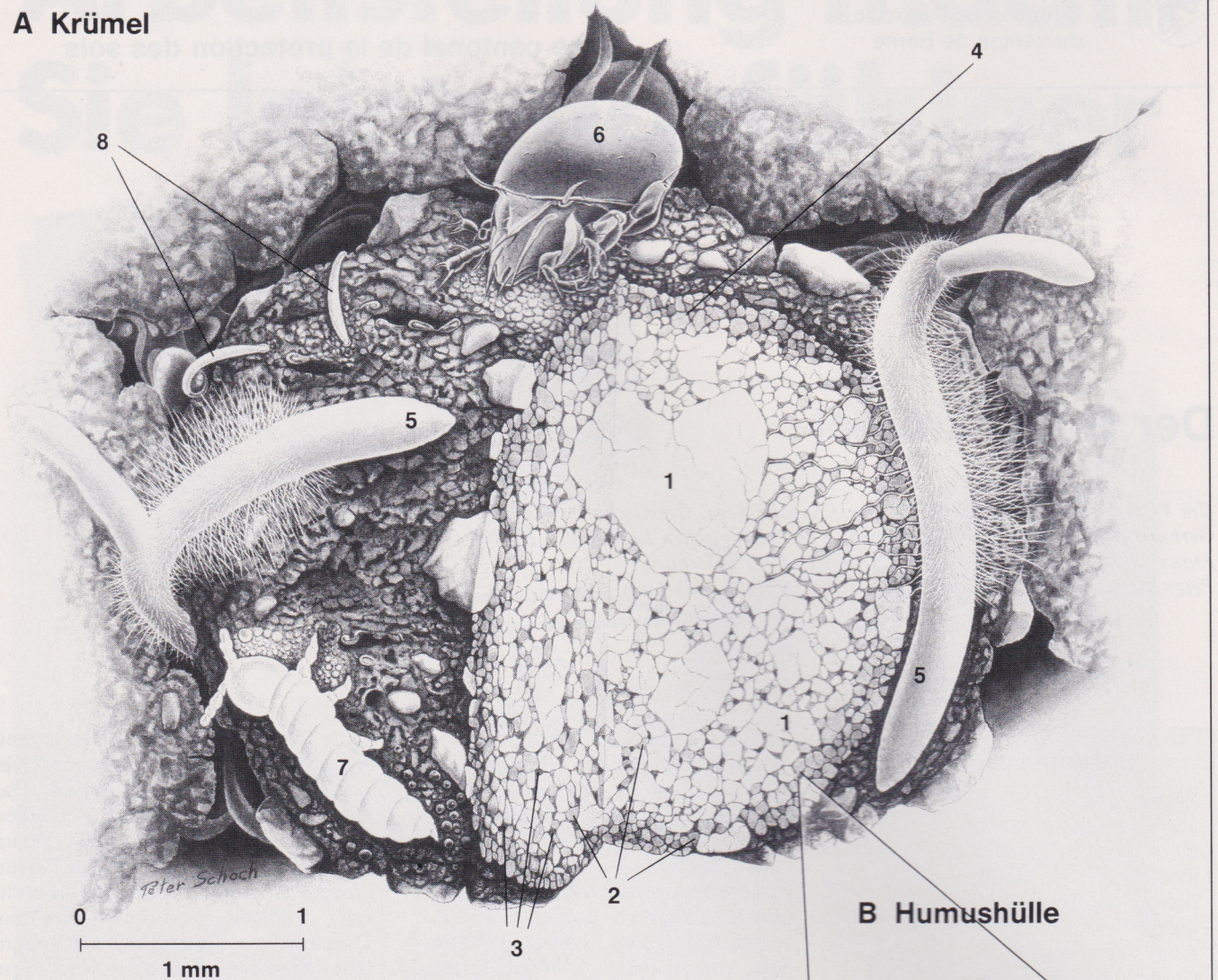
Eine andere Art der Aggregatbildung geschieht beim Quellen und Schrumpfen der Feinerde. Bedingt durch das hohe Wasserhaltevermögen der Tonminerale quillt der Boden bei der Wasseraufnahme und schwindet wieder bei der Wasserabgabe. Dadurch entstehen Schwundrisse, in welche Bodenlebewesen (Bakterien, Pilze, Algen und Pflanzenwurzeln) einwandern können. Durch die Besiedlung mit Bodenlebewesen und deren Aktivitäten bildet sich entlang der Schwundrisse nach und nach ein Humusfilm. Dies bewirkt die charakteristische Ausprägung von Böden mit hohem Tongehalt: die Krümel sind polyedrisch mit kantigen Bruchflächen.

Die Zwischenräume zwischen den Krümeln sind so gross, dass Wasser darin abfließen kann (Groporen). Dadurch kann Luft in diesen Hohlräumen zirkulieren. Die chemisch aktive Oberfläche der Humushülle vermag

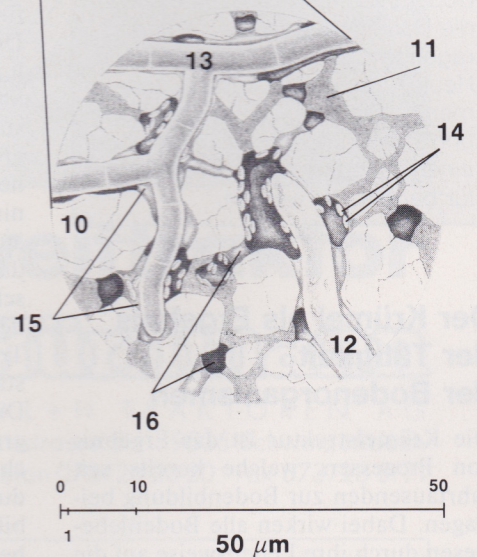


# Krümel

## A Krümel



## B Humushülle



### Krümel

#### A Makro-Ausschnitt «Krümel»

- 1 Mineralische Bestandteile (Sand)
- 2 Organische Bestandteile («Humus»)
- 3 Porensystem mit Luft/Wasser
- 4 Humus-Anreicherungs-Zone («Humushülle»)  
z. T. verschleimt
- 5 Wurzelspitze mit Wurzelhaaren
- 6 Milbe (Acari)
- 7 Springschwanz (Collembola)
- 8 Fadenwurm (Nematoda)

#### B Mikro-Ausschnitt «Humushülle»

- 10 Mineralische Bestandteile (Silt)
- 11 Organische Substanz, verkittet mit Ton-Teilchen  
(«Ton-Humus-Komplex»)
- 12 Wurzelhaar
- 13 Pilzfaden (Hyphe)
- 14 Bakterien
- 15 Wasser
- 16 Luft

Abb. 1. Zerdrückt man eine Erdscholle zwischen den Fingern, zerfällt sie in der Regel in kleine, unregelmässig geformte Teile: diese Teile nennt man Krümel. Jeder Krümel besteht etwa zur Hälfte aus Poren und aus mineralischem Material. Je nach Feuchtigkeit des Bodens sind mehr oder weniger Poren mit Wasser gefüllt. Der gesunde Krümel ist von einer Humushülle umgeben. Auf und in dieser Hülle spielt sich ein grosser Teil des Bodenlebens ab. Hier findet man Bakterien, Pilzfäden, Springschwänze etc. Die Wurzelspitzen der Pflanzen können nicht in den Krümel eindringen, sondern umfahren ihn. Lediglich die Seitenhärchen sind fein genug, um hineindringen zu können. Dort nehmen sie Nährstoffe und Wasser auf.



organische Stoffe zu binden. Diese Funktion ist besonders wichtig für die Filterung des Regenwassers.

## Die Bedeutung der Bodenstruktur

Unter Bodenstruktur versteht man die räumliche Anordnung der Bodenbestandteile Sand, Schluff, Ton und Humus. Liegen diese Teilchen sortiert vor, so verstärken sich ihre negativen Eigenschaften; sind dagegen die Bodenbestandteile zu Krümeln aggregiert, verstärken sich ihre positiven Eigenschaften (siehe Tab. 1).

## Gefahren für die Bodenstruktur

Aggregate sind verwitterungsempfindlich, da die Verleimung der Bodenbestandteile durch starke Sonnenbestrahlung und durch heftige Regenfälle geschwächt wird.

Durch Befahren und Bearbeiten des Bodens werden die Humushüllen teilweise beschädigt. Dadurch verschwindet der Trenneffekt zwischen den Aggregaten. Das führt langfristig zur Klumpenbildung. **Werden diese Klumpen bei einer Nachbearbeitung mit einem zapfwellengetriebenen Gerät bearbeitet, so wird durch das Zerschlagen der Klumpen Feinerde freigesetzt, welche mit dem nächsten Niederschlag in die Tiefe verlagert wird (sog. innere Erosion).**

Die auf natürliche Art stabilisierte Bodenoberfläche sowie die Wurzelkanäle und Regenwurmgänge werden durch tiefgreifende Bearbeitungswerkzeuge geschädigt. Die verletzte oder gar gewendete Bodenoberfläche ist viel verschlammungsempfindlicher als nicht bearbeiteter, garer Boden. Ein Boden mit sehr stabilem Krümelgefüge leidet auch weniger unter Bearbeitungseingriffen als ein Boden mit geschwächter Struktur. Wenn also die Stabilisierungsfilme der Bodenoberfläche – seien das Krümel oder Wurzelkanäle – verletzt sind, werden durch das Niederschlagswasser Feinerdeteilchen ausgespült und verlagert. Diese Verlagerung erfolgt in der ersten Phase senkrecht entlang der Grobporen und Gefügeklüfte. Diese inneren Verdichtungen lassen sich mechanisch nicht mehr lockern. Die Hohlräume werden nach und nach verstopft. Das Niederschlagswasser kann somit nicht mehr

Tab. 1. Positive und negative Eigenschaften verschiedener Bodenbestandteile

Bodenbestandteile	Eigenschaften	
	positive	negative
Sand	gut durchlässig für Wasser und Luft, verbessert die Tragfähigkeit	keine Speicherkapazität für Wasser- und Nährstoffe
Schluff	gute Wasserspeicherung	gehemmte Durchlässigkeit und Durchlüftung
Ton	gute Nährstoffspeicherung, Quellen und Schrumpfen	undurchlässig für Wasser und Luft
Humus	Trennschicht zwischen den Aggregaten, chemisch aktive Oberfläche (Filtereigenschaften)	geringe Tragfähigkeit

### Abschätzung einer Schadenbilanz

Schadensursache	Gewicht von strukturgeschädigtem Boden in t/ha·Jahr
Durch das <b>Befahren</b> eines Feldes wird beim Kartoffelanbau im Verlaufe eines Jahres ein flächendeckender Radspuranteil von 200 % bis 300 % erreicht. Das Profil eines Traktorpneus hat einen um mindestens das Vierfache grösseren Bodendruck als die gesamte Auflagefläche des Pneus. Es wird mindestens soviel Bodenvolumen verdrängt und plastisch verformt, wie dem Profilvolumen der Reifen entspricht. Durch die plastische Verformung wird die Krümelstruktur weitgehend zerstört. Durch den Schlupf der Zugmaschine werden weitere Krümel abgeschert. Geschätzt entspricht das etwa einem Zentimeter Bodenschicht, in welchem die Struktur durch das Befahren zerstört wird.	100
Durch das <b>Bearbeiten</b> eines Feldes werden etwa 5 bis 10 % der Krümel zerschlagen. Das entspricht bei einer Bearbeitungstiefe von 20 cm einer Bodenschicht von 1 bis 2 cm.	100-200
Wenn ein frischgepflügter Acker <b>unbedeckt überwintert</b> , stellt man im Frühjahr fest, dass mindestens 2-5 mm Feinerde von den Erdschollen abgespült ist. Dies lässt sich sehr leicht an den Steinchen feststellen, die noch wie Inseln aus den Furchen herausragen.	20-50
Gesamtverlust an Krümelgefüge:	220-350

genügend rasch versickern und fließt oberflächlich ab. Bei einer instabilen Bodenoberfläche werden Feinerdeteilchen mitgerissen und in der Falllinie verlagert (Erosion). Die Bodenlebewesen brauchen eine lange Zeit, um diese Verletzungen wieder zu heilen. Für eine 30 cm mächtige Krume dauert das ca. 100 Jahre!

## Regenerierung der Bodenstruktur

Bei einem dichten Regenwurmbesatz von 200 bis 400 Regenwürmern/m<sup>2</sup> können durch deren Tätigkeit in einer Wiese etwa 30 bis 50 Tonnen frisch strukturierte Feinerde pro Jahr ent-



### Beispiel einer Strukturbilanz

Angenommen es wird eine Bernerfruchtfolge mit 2 Jahren Kunstwiese, 2 Jahren Getreide und 2 Jahren Hackfrüchten eingehalten, so sieht die Bilanz der Strukturbildung pro ha bei einer Regenerierungsrate von 5 mm pro Jahr folgendermassen aus:

2 Jahre Kunstwiese	+ 100 t strukturierte Erde
1 Jahr Kartoffeln	- 300 t
1 Jahr Zuckerrüben	- 150 t
2 Jahre Getreide	0 t*
Bilanz einer Fruchtfolge:	- 350 t Strukturverlust

Wenn eine geringere Regenerierungsrate von 3 mm strukturierter Feinerde pro Jahr angenommen wird, ergibt sich folgende Bilanz:

2 Jahre Kunstwiese	+ 60 t
1 Jahr Kartoffeln	- 300 t
1 Jahr Zuckerrüben	- 150 t
2 Jahre Getreide	0 t*
Bilanz einer Fruchtfolge:	- 390 t Strukturverlust

In einer getreidebetonen Fruchtfolge:

3 Jahre Kunstwiese	+ 90 t
1 Jahr Kartoffeln	- 300 t
2 Jahre Getreide	0 t*
Bilanz einer Fruchtfolge:	- 210 t Strukturverlust

Getreide-Wiese Fruchtfolge:

3 Jahre Kunstwiese	+ 90 t
2 Jahre Getreide	0 t*
Bilanz einer Fruchtfolge:	+ 90 t Strukturneubildung

\*Schäden werden durch Neubildung kompensiert

### Résumé

#### La structure grumeleuse du sol

Les sols sont le support de tous les systèmes écologiques terrestres. Ils ne peuvent remplir leurs fonctions que si leur structure est intacte. Le « grumeau » est l'élément de base de cette structure intacte. Il est le résultat d'un processus de formation du sol qui s'est déroulé pendant des millénaires et dans lequel les organismes vivant dans le sol jouent un rôle prépondérant. Aujourd'hui, l'érosion, la battance et le tassement sont les signes visibles de la dégradation de la structure grumeleuse du sol.

### Summary

#### The soil crumb

Soils are the leading element of land ecosystems. Their functions are accomplished on an intact soil structure, only. The crumb is the building stone of a sound soil structure. It is the result of a millennium lasting pedogenesis during which soil organisms hold an outstanding position. Processes of soil degradation such as erosion, siltation and compaction are the mechanisms responsible for the decline in crumb structure.

stehen. Dabei wurde nur der Regenwurm Kot gerechnet, welcher an der Bodenoberfläche abgesetzt wird. Die Losungen, welche an den Wurmgängen ausgeschieden werden, dienen lediglich zur Regenerierung des bestehenden Hohlraumsystems und nicht zur Neubildung des Bodens.

## Fruchtfolge und Bodenstruktur

Wenn der Boden durch intensive Ackerfruchtfolgen weiterhin überstrapaziert wird, ist innerhalb von dreissig Jahren mit der völligen Zerstörung der Bodenstruktur zu rechnen. Dann verstärken sich die negativen Eigenschaften der Bodenbestandteile, die Böden sind kaum mehr tragfähig und bearbeitbar. Bis die Bodenbewesen die Struktur wieder aufgebaut haben, sind mindestens hundert Jahre nötig und das nur unter schonendster Wiesenutzung.

Eigene Infiltrationsmessungen haben ergeben, dass die Wasserdurchlässigkeit von Ackerböden gegenüber naturnah genutzten Randstreifen um 2 bis 3 Zehnerpotenzen abgenommen hat.

## Folgerungen

Es gibt Fruchtfolgen und Anbautechniken, welche die Regenerierung der Bodenstruktur sicherstellen. Neben einer Bereifung, die genügend weich ist, um von Bodenunebenheiten verformt zu werden und keine Fahrspuren zu erzeugen, ist auch das Bearbeiten in genügend abgetrocknetem Zustand des Bodens von grösster Bedeutung. Man muss also wieder lernen, warten zu können, bis der Boden eine Bearbeitung erträgt. Neben mechanischen Schäden sind auch stoffliche Belastungen für die Bodenbewesen kaum mehr zuträglich. Der momentane durch den Menschen verursachte schädliche Stoffeintrag ist zum Beispiel an den erhöhten Cd-Gehalten des Regenwurmkotes feststellbar. Die Folgen solcher Schadstoffbelastungen für das Bodenleben sind noch nicht abzusehen. Ebenfalls unklar sind die sich überlagernden Auswirkungen von mechanischen und stofflichen Schäden auf das Bodenleben.