

Zeitschrift: Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen = Swiss forestry journal = Journal forestier suisse

Herausgeber: Schweizerischer Forstverein

Band: 104 (1953)

Heft: 4-5

Artikel: Über das Bodengefüge

Autor: Bach, R. / Deuel, H.

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-767568>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 20.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Zitierte Literatur

1. Aaltonen, V. T.: Boden und Wald. Berlin und Hamburg 1948.
2. Mattson, Sante, und Koutler-Andersson, Elisaveta: The acid-base condition in vegetation, litter and humus. Ann. Agric. Coll. Swed., 9, 1941.
3. Wittich, W.: Untersuchungen über den Verlauf der Streuezersetzung auf einem Boden mit Mullzustand. Forstarchiv, 15, Hannover 1939; Forstarchiv, 19, Hannover 1943; Forstarchiv, 20, Hannover 1944.
4. Ebermayer, E.: Die gesamte Lehre der Waldstreu mit Rücksicht auf die chemische Statik des Waldbaus. Berlin 1876.
5. Chandler, R.: The amount and mineral nutrient content of freshly fallen leaf in the hardwood forests of Central New York. J. Amer. Soc. Agron., 33, 1941.
— Amount and mineral content of freshly fallen needle litter of some northeastern conifers. Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 1943 (zitiert nach Aaltonen).
6. Mork, E.: Om skøfallet i våre skoger. Medd. norske Skogsundersøksves., 29, 1942.
7. Richard, F.: Der biologische Abbau von Zellulose- und Eiweißtestschnüren im Boden von Wald- und Rasengesellschaften. Mitt. d. Schweiz. Anst. f. d. forstl. Versuchswesen, XXIV, 1945.

Über das Bodengefüge¹

(11.4)

Von R. Bach und H. Deuel

Agrikulturchemisches Institut der Eidgenössischen Technischen Hochschule in Zürich

Inhalt

- Einleitung
I. Formen des Bodengefüges
II. Beständigkeit des Bodengefüges
III. Bildung des Bodengefüges
IV. Das Bodengefüge verschiedener Bodentypen
V. Methoden zur Analyse des Bodengefüges
VI. Bodengefüge und Bodenfruchtbarkeit
VII. Verbesserung des Bodengefüges
Schluß
Literatur
Résumé

Einleitung

Die heutigen Kenntnisse über das Bodengefüge sollen in dieser Arbeit vor allem für die Förster in der Praxis kurz zusammengefaßt werden. Die Literaturangaben werden darum auf einige wenige Arbeiten beschränkt, in denen das Bodengefüge einläßlich behandelt ist, so von Baver (1948), Demolon (1948), Joffe (1949), Kubiena (1938), Russell (1950), Shaw (1952) und Van Schuylenborg (1947). Die Zahl der Veröffentlichungen über das Bodengefüge beträgt viele Hunderte; wenn man die grundlegenden Arbeiten über Konstitution und Eigenschaften der Bodenbestandteile hinzurechnet, welche für das Bodengefüge von Bedeutung sind, so geht sie in die Tausende.

¹ Herrn Schulspräsident Prof. Dr. H. Pallmann zu seinem 50. Geburtstag am 21. Mai 1953.

I. Formen des Bodengefüges

Das Bodengefüge ist durch die räumliche Anordnung der festen Bestandteile und indirekt durch das Poresystem des Bodens gekennzeichnet. Ein Boden kann *nicht aggregiert* oder *aggregiert* sein. Wenn er aggregiert ist, so sind die einzelnen Bestandteile zu Aggregaten bestimmter Form und Größe miteinander mehr oder weniger fest verbunden, und zwischen den Aggregaten bestehen größere Hohlräume; ist er nicht aggregiert, so sind die Einzelteilchen meist in kompakter Lagerung; bindige Böden bilden eine einzige kohärente Masse (massives Gefüge); nichtbindige Böden liegen in loser Einzelkornzerteilung vor. Die Gefügeformen aggregierter Böden werden nach verschiedenen Merkmalen eingeteilt, so nach *Form und Größe der Aggregate*, nach *Art und Grad der Aggregierung* und schließlich nach dem *Hohlraumsystem*, das durch die Aggregierung entsteht.

Im amerikanischen *Soil Survey* (1951) wird das Gefüge der Böden klassiert nach:

1. Form der Aggregate: plattig, prismatisch, kubisch und sphäroid (mit weiteren Unterteilungen);
2. Größe der Aggregate: sehr fein, fein, mittel, grob und sehr grob (Größenklassen je nach Form der Aggregate verschieden);
3. Grad der Aggregierung: schwach, mäßig, stark.

Frei (1950) unterscheidet hauptsächlich nach genetischen Merkmalen folgende Gefügetypen:

- | | | |
|------------------------|---|---------------------------|
| 1. Primitivgefuge | } | schwach aggregierte Böden |
| 2. Hüllengefuge | | |
| 3. Mikroaggregatgefuge | } | gut aggregierte Böden |
| 4. Makroaggregatgefuge | | |
| 5. Klumpengefuge | | |
| 6. Schwammgefuge | | |

II. Beständigkeit des Bodengefüges

Der Widerstand, den eine Bodenprobe einer Formänderung entgegenseetzt, wird *Konsistenz* genannt. Druck-, Zug-, Scher- und Schlagfestigkeit werden mit den verschiedensten Methoden und Geräten gemessen.

Nach Atterberg unterscheidet man heute allgemein zwischen den Konsistenzformen kompakter Böden, wobei die Bodeneinzelteilchen in möglichst dichter Packung vorliegen, und Konsistenzformen gelockerter Böden, wobei die Bodeneinzelteilchen zu Aggregaten vereinigt sind, die in sich und zwischen sich ein beträchtliches Hohlraumsystem aufweisen.

Bei den Konsistenzformen *kompakter* Böden unterscheidet man nach dem Wassergehalt *flüssige*, *plastische* und *feste* Konsistenz; die Grenzen dazwischen werden Fließgrenze und Ausrollgrenze bzw. untere und obere Plastizitätsgrenze genannt.

Gewachsene Böden zeigen unter natürlichen Bedingungen die Konsistenzformen *gelockerter* Böden; diese sind sehr schwer zu erfassen. Beim amerikanischen *Soil Survey* unterscheidet man zwischen:

1. Konsistenz im *nassen* Zustand:
 - a) nach *Klebrigkeitsgrad*: nicht, wenig, mäßig, stark klebrig;
 - b) nach *Plastizität*: nicht, wenig, mäßig, stark plastisch;
2. Konsistenz im *feuchten* Zustand:
lose, sehr krümelig, krümelig, fest, sehr fest, extrem fest;
3. Konsistenz im *trockenen* Zustand:
lose, weich, schwach hart, mäßig hart, sehr hart, extrem hart; und
4. *Zementierung*: wenig zementiert, stark zementiert, verhärtet.
(Unter Zementierung wird eine Verfestigung durch Karbonate, Kieselsäure oder Sesquioxide verstanden, die unabhängig ist vom Wassergehalt.)

Wenn das natürliche Aggregatgefüge durch mechanische Beanspruchung zerstört wird, so können die Konsistenzformen kompakter Böden zur Geltung kommen, so zum Beispiel bei der Bearbeitung mit Ackerbaugeräten, beim Befahren des Bodens oder, unter natürlichen Bedingungen, beim Kriechen oder Rutschen des Bodens. Die Anordnung der Einzelteilchen im natürlichen Gefüge beeinflußt die Konsistenz kompakter Böden weit weniger als die Art der Einzelteilchen.

Die Stabilität des natürlichen Bodengefüges hängt in erster Linie von der *Stabilität der Aggregate* ab; die Stabilität der Aggregatanordnung ist daneben weniger wichtig. Von größter Bedeutung ist die *Stabilität gegenüber Wasser*: Verschlämmlung und Verkrustung an der Oberfläche, Verdichtung innerhalb des Profils sind die Folgen mangelnder Stabilität. Da beim Trocknen alle bindigen Böden hart werden und zu Aggregaten zerteilt werden können, unterscheidet man wasserbeständige oder echte und wasserunbeständige oder unechte Aggregate.

III. Bildung des Bodengefüges

Das Gefüge des Bodens hängt in erster Linie von seinen Bestandteilen ab. Das Bodenskelett, Sand- und Schluffkörner, sowie unzersetzte Humusbildner können allein keinen festen Verband bilden. Der Zusammenhalt wird durch jene Bestandteile bewirkt, die eine große spezifische Oberfläche haben und viele Haftpunkte bieten. Diese Stoffe werden im folgenden einzeln behandelt; unbekümmert um den mengenmäßigen Anteil und die Bedeutung, die sie sonst haben, werden sie einfach *Bindesubstanzen* genannt. Außerdem ist auch die *Art der Aggregierung*

zu untersuchen, d. h. man fragt nach den Kräften und Prozessen, welche die Aggregierung bewirken. Das Aggregatgefüge eines Bodens ist aber nicht bloß dadurch gekennzeichnet, daß die Einzelteilchen miteinander verbunden sind, sondern auch durch bestimmte Form und Größe der Aggregate. Diese ist zum Teil bedingt durch die Art der Bindesubstanz und der Aggregierung; daneben gibt es aber spezifische Prozesse, welche die *Formgebung der Aggregate* bewirken. Schließlich ist der Einfluß der *Bodenbildungsfaktoren* auf das Gefüge zu untersuchen.

A. Bindesubstanzen

1. *Alkalosalze, Gips.* In Salzböden arider Gebiete kann der ganze Oberboden durch Salz vollständig verkrustet sein. Schon durch geringe Salzmengen werden einzelne Bodenkörper miteinander verbunden. Zur Regenzeit verwandeln sich solche Böden aber in einen schlammigen Brei, da das Salz dann aufgelöst wird.

2. *Kalziumkarbonat.* Aus der Petrographie ist bekannt, daß Lockergesteine durch Kalziumkarbonat diagenetisch verfestigt sein können. Junge Böden auf solchen Gesteinen enthalten viele kalkverfestigte Mineralaggregate, welche aus dem *Muttergestein* stammen.

Eine Aggregierung kann aber auch durch Kalziumkarbonat bewirkt werden, das aus der *Bodenlösung* wieder ausgeschieden wird. Solche Kalkkonkretionen kommen vor in Form von *Kalkflaum*, der hauptsächlich die Oberflächen der Bodeneinzelteilchen überzieht, oft auch das Innere der Aggregate durchzieht; in Form von Krusten, die sich in kalkhaltigen Böden hauptsächlich auf der Unterseite des Bodenskelettes finden, wobei oft grobe Sandkörper fest eingeschlossen sind; und in Form eines «*Mörtels*», der einen ganzen Bodenhorizont mehr oder weniger verkrustet (*Kalkortstein, Kalkkrusten*). Eine besondere Art der Verfestigung durch Kalziumkarbonat sind die *Lößkindel*, die äußerlich die Form von verwachsenen Kartoffelknollen haben, im Innern aber hohl und aufgesprungen sind. Es kommen auch kleine *Kalkröhren* vor, die sich um Wurzeln herum bilden.

Von den eben beschriebenen Kalkkonkretionen sind *Tuff, Seekreide, Kalksinter* usw. zu unterscheiden, die sich in Naßböden aus *Fremdwasser* bilden.

3. *Kieselsäure.* In gewissen Böden arider Klimate können die Bodeneinzelteilchen auch durch Kieselsäure miteinander verkittet sein. Die Zementierung kann bis zum kompakten Ortstein fortschreiten. Die Kieselsäure kann auch mit Sesquioxiden zusammen in Form gemengter Gele vorkommen, die bei der Entwässerung oft irreversibel ausflocken.

4. *Sesquioxyde.* In gut drainierten Böden kommen freies Eisen und Aluminium vor allem in Form von Oxyhydraten vor. In Braunerden bilden diese um die Mineralkörper eine *Verwitterungshaut* (zusammen

mit Kieselsäure = Allophanton); als *feine Konkretionen* durchsetzen sie ferner den ganzen Boden. In Podsolen ist der B-Horizont durch Sesquioxyde, die mit Humus zusammen eingespült worden sind, unter Umständen bis zur *Orterde* oder gar bis zum *Ortstein* verfestigt. In Gelberden, Roterden und Lateriten bilden die Sesquioxyde Konkretionen: solche von *mikroskopischer* Größe, *pisolithartige*, faustgroße *Knollen* oder «Schlacken»; auch vollständige Zementierung des ganzen Bodens kommt vor (*Krusten, Lateritpanzer*). In den sog. Lehmen (Braun-, Gelb- und Rotlehmen) finden sich die Sesquioxyde weniger in Form von Konkretionen als vielmehr von *Gelen*, welche die ganze Bodenmasse durchsetzen. Im feuchten Zustand sind die Lehme schmierig; trocken sind sie hartschollig, während die Erden stets krümelig sind.

Eine besondere Form von Eisenkonkretionen findet sich in wechselfeuchten Böden: Sie entstehen durch Fällung des Eisens, das während der Vernässung reduziert worden ist und bei Luftzutritt wieder oxydiert wird. Solche *Gleikonkretionen* bilden um alte Wurzelkanäle oft ganze Röhren.

Schließlich sei auch das *Rasen-* oder *Sumpferz* erwähnt, ein sehr wasserreiches Eisenoxydhydratgel, mit dem gewisse Moorböden durchsetzt sind. Auch knollige Konkretionen kommen darin vor.

Aus dem Gesagten geht hervor, daß nicht bloß die Menge an Sesquioxyden, sondern auch die Form, in der sie vorliegen, für das Bodengefüge von Bedeutung ist.

5. *Ton*. Daß Ton für die Aggregierung der Böden nötig ist, ist eine altbekannte Tatsache. Bodenkundlich spricht man von der Tonfraktion; sie umfaßt, nach der Definition der Internationalen Bodenkundlichen Gesellschaft, alle unlöslichen mineralischen Bestandteile des Bodens mit weniger als 0,002 mm Durchmesser. *Bauer* hat anhand sehr vieler Analysen eine enge positive Korrelation zwischen *Tongehalt* und Aggregierung der Böden herausgefunden. In der Tonfraktion sind die eigentlichen *Tonmineralien* von größter Bedeutung (Tonmineralien = wasserhaltige sekundäre Silikate mit Schichtgitterstruktur; s. *Deuel*, 1950). Montmorillonit wirkt zum Beispiel stärker aggregierend als Kaolinit; dieser bildet eher flache, jener eher isometrische Aggregate.

6. *Organische Substanz*. Humus macht leichte Böden schwerer und schwere Böden leichter; dies ist eine alte Erfahrung. In Übereinstimmung damit hat *Bauer* anhand vieler Analysen eine hohe positive Korrelation zwischen *Humusgehalt* und Aggregierung des Bodens gefunden. Die Korrelation ist um so höher, je kleiner der Tongehalt ist. Humus bildet größere Aggregate und wirkt überhaupt viel stärker aggregierend als Ton.

Auch die *Humusform* beeinflußt die Aggregierung der Böden. Durch Rohhumus, d. h. unzersetzte Humusbildner, wird ein Boden nicht

gekrümelt, wohl aber durch die «echten Humusstoffe», die mit dem mineralischen Material innig vermischt sind.

Die neuesten Forschungen sollen abklären, welche *organischen Verbindungen* besonders wirksam sind. Versuche haben gezeigt, daß u. a. Polysaccharide und Eiweiße den Boden krümeln (*Soil Science*, 1952). Abzuklären ist auch, ob diese Verbindungen pflanzliche Abbauprodukte oder Neubildungen durch Bodenlebewesen sind, wie zum Beispiel Tier- oder Bakterienschleime.

7. *Bodenlebewesen*. Sand- und Schluffkörner können in einem dichten Wurzelwerk wie in einem Filz festgehalten sein. Aggregate werden durch Wurzeln miteinander verbunden. Algen und Pilze können mit ihren Fäden den ganzen Boden durchziehen und damit zur Aggregierung beitragen.

8. *Wasser*. Trockenes Tonpulver kann mit Wasser in eine klebrige Paste verwandelt oder ganz suspendiert werden; beim Austrocknen bilden sich harte Klumpen. Bei einem bestimmten Wassergehalt bekommt auch Sand einen gewissen Zusammenhalt; bei höherem Gehalt fällt er allerdings ganz dahin. Wenn der Wassergehalt bindiger Böden bis zu einem gewissen Punkt erniedrigt ist, so können sogar sehr beständige Aggregate entstehen, die auch nachfolgender Benetzung widerstehen.

B. Art der Aggregierung

1. *Polykondensation*. Eisen- und Aluminiumhydroxyd und auch Kieselsäure kommen unter natürlichen Bedingungen nicht im monomolekularen Zustand vor. Kieselsäure verbindet sich unter sich oder mit Eisen- oder Aluminiumhydroxyd unter Wasseraustritt zu einem Gel. Dadurch wird ein Zusammenhalt bewirkt, der um so stärker ist, je weiter der Prozeß fortgeschritten ist.

2. *Kristallisation*. Lösliche Salze kristallisieren wieder aus, wenn der Boden austrocknet. Der Boden kann dadurch verfestigt werden.

3. *Kristallverwachsung*. Es ist nachgewiesen, daß in die Oberfläche von Quarzkristallen Tonmineralien eingebaut sein können. Eine solche Verwachsung kann auch unter Tonmineralien vorkommen, sei es direkt oder mittels Einlagerung von Kieselsäure oder Eisen-, Aluminium- oder Magnesiumhydroxyd. Kristallverwachsung kann auch bei Alkali- und Erdalkalisalzen vorkommen.

4. *Parakristallisation*. Tonteilchen haben die Tendenz, sich parallel aneinanderzulagern; beim Trocknen können alsdann stabile, praktisch irreversible Aggregate entstehen. Bei dieser Anordnung dürften ebenfalls Gitterkräfte wirksam sein.

5. *Koagulation*. Die wichtigsten Bindesubstanzen im Boden, nämlich Tonmineralien, Sesquioxyde und Humus, sind typische Kolloide und zum Teil ausgeprägte Polyelektrolyte mit sehr großer Oberfläche. Sie werden durch Hydratation und elektrisches Potential dispergiert, in

Suspension gehalten oder gelöst. Stabile Bodenaggregate bilden sie nur, wenn sie koaguliert sind. Einige wichtige Flockungsregeln sind zum Beispiel folgende (s. Pa 11 m a n n , 1938): Das *Potential* der Teilchen läßt sich durch Änderung der Gegenionen vermindern (Hofmeistersche Ionenreihe: $\text{Li}^+ < \text{Na}^+ < \text{K}^+ < \text{Rb}^+ < \text{Cs}^+$; Schulze-Hardysche Wertigkeitsregel: $\text{Na}^+ < \text{Mg}^{++} < \text{Al}^{+++}$; Ionenumtausch: siehe Deuel und Hostettler, 1950). Amphotere Körper ändern die Aufladung mit der pH-Verschiebung; im isoelektrischen Punkt sind sie geflockt.

Von besonderem Interesse ist die Feststellung, daß das H^+ -Ion stärker koaguliert als das Ca^{++} -Ion. Die Tatsache, daß kalkhaltige Böden besser gekrümelt sind als versauerte, läßt sich deshalb nicht mit der Flockungswirkung des Ca^{++} -Ions erklären. Wohlbekannt ist dagegen die Tatsache, daß Na^+ -reiche Böden ein schlechtes Gefüge haben und daß dieses mit Ca^{++} verbessert werden kann; dies entspricht den Flockungsregeln.

Die konsequente Anwendung der Wertigkeitsregel läßt erwarten, daß ein Polyelektrolyt am stärksten durch einen entgegengesetzt geladenen Polyelektrolyten geflockt wird. Dies bestätigt sich auch bei Kolloiden. Kolloid-Kolloid-Flockung kommt vor zwischen Kieselsäure und Eisen- oder Aluminiumhydroxyd; im Boden bilden sie zusammen die «gemengten Gele» und «Allophantone». Auch mit Humus können die Sesquioxide unter geeigneten Bedingungen Kolloid-Kolloid-Flockung eingehen.

Das Flockungsvermögen von hochpolymeren Stoffen hängt nicht einfach von der Art der monomeren Bausteine ab, sondern es müssen auch andere, zum Teil schwer erfaßbare Faktoren von Bedeutung sein, wie zum Beispiel Molekulargewicht, Knäuelungsgrad und Verzweigungsgrad der Molekel. Dies trifft sowohl auf die Flockung von hochpolymeren Stoffen mit einfachen Elektrolyten (Deuel und Solms, 1951) als auch auf die Flockung von Tonmineralien mit hochpolymeren Stoffen zu.

Die *Hydratation* der Bodenkolloide wird durch Austrocknung überwunden. Diese wird nicht nur durch trockenes, warmes Wetter verursacht, sondern auch durch Gefrieren des Wassers im Boden. Die Eissbildung beginnt in den großen Hohlräumen; durch Sammelkristallisation wird Wasser aus den feinen Poren herausgezogen, die Kolloide werden dehydratisiert. Gleichzeitig wird die Elektrolytkonzentration der verbleibenden Bodenlösung erhöht und die Koagulation damit verstärkt.

Die Kräfte, welche die Einzelteilchen der Koagulate zusammenhalten, sind noch wenig bekannt. Sicher sind es keine «Ionenbrücken» einfacher Ionen; denn es liegt im Wesen der heteropolaren Bindung, daß sie nicht gerichtet ist, d. h. daß den Anionen keine bestimmten Kationen zugeordnet werden können (vgl. Deuel, Huber und Anyas-Weisz, 1950).

Eher dürften es eine große Zahl von *Nebenvalenz-* und eventuell *Wasserstoffbindungen* sein, die zwei Teilchen zusammenhalten. Auch ein Übergang in den parakristallinen oder kristallinen Zustand und Kristallverwachsung kommen in Frage, ebenso die Ausbildung koordinativer Bindungen (Komplexbildung) und Polykondensation der Teilchen. Die Koagulation wird in diesen Fällen irreversibel. Alle diese Bindungen werden um so wirksamer, je mehr die Teilchen einander genähert, d. h. je stärker ihr Potential herabgesetzt und je mehr dehydratisiert sie sind, je mehr die Teilchen gerichtet sind und je größer ihre parallelen Oberflächen sind.

Schließlich ist noch der Fall zu erwähnen, daß die Kolloidteilchen ein Mittel anlagern, dessen Moleküle am einen Ende hydrophil, am andern hydrophob sind (z. B. höhere Fettsäuren). Die Teilchen selbst werden dadurch hydrophob, und zur Verminderung der Grenzflächenspannung lagern sie sich zusammen und flocken aus.

Bei all dem darf man nicht vergessen, daß Koagulation für die Aggregierung des Bodens nicht genügt, sondern weitere Vorgänge dafür nötig sind.

6. *Adsorption.* Eine große Rolle spielen bei der Aggregierung des Bodens die sog. Ton-Humus-Komplexe, die allgemein als Adsorptionskomplexe betrachtet werden. Praktisch kann allerdings zwischen Aggregierung durch reine Elektrolytkoagulation und durch Adsorption nicht scharf unterschieden werden, da alle Übergänge und Kombinationen vorkommen. Man nimmt an, daß bei der Adsorption, zum Beispiel von organischen Nichteletrolyten an Tonmineralien, polare Gruppen der organischen Moleküle mit polaren Gruppen der Tonmineralien in gegenseitiger Beziehung stehen. Man hat aus den Böden zum Beispiel Polysaccharide isoliert, die reich an polaren Gruppen sind und an den Tonen stark haften können.

7. *Mechanischer Zusammenhalt.* Wurzeln, Pilz- und Algenfäden können Einzelteilchen mechanisch zusammenhalten. Auch Kalziumkarbonat und Sesquioxide können den Boden wie ein Netz durchziehen und verfestigen. Mechanischer Zusammenhalt liegt auch vor, wenn das Bindemittel eine zusammenhängende Grundmasse bildet, in welche die Bodenkörper eingebettet sind, ebenso wenn das Bindemittel eine Hülle um mehrere Einzelteilchen zusammen bildet, wie dies bei Schleimstoffen denkbar ist.

In humusreichen Böden dürften die organischen Verbindungen ein riesiges dreidimensionales Netz bilden, das zum Teil durch kovalente Bindungen, zur Hauptsache aber durch Nebenvalenzbindungen und durch rein mechanische Verfilzung zusammengehalten wird. In diesem Netz können Einzelteilchen und Aggregate rein mechanisch verfilzt sein. Hochpolymere organische Moleküle können nicht nur die Koagulation der mineralischen Kolloide verursachen, sondern die Koagulate

auch unter sich oder direkt mit dem ganzen Netz verbinden. Auch durch bloße Adsorption können einzelne Bestandteile mit dem Netz verbunden werden.

C. Formgebung der Aggregate

1. *Formung durch Bodentiere.* Die Bodentiere formen das Bodengefüge dadurch, daß sie das unverdauliche Material in Exkrementen bestimmter Form und Größe ausscheiden. Der Humushorizont von Trockensteppenböden, Schwarzerden, Braunerden, Rendzinen und Humuskarbonatböden besteht praktisch aus lauter Wurmlosungen; denn mit dem organischen Material nehmen die Würmer auch minerales auf und vermischen beides innig miteinander. Im A₁-Horizont von Podsole und Humuskarbonatböden mit Mōrauflagen dominieren die Lösungen von Kerbtieren. In gewissen Tropengegenden sollen die Ameisen und Termiten die aktiven Erbauer des Bodengefüges sein.

Dadurch, daß die Bodentiere Gänge in die kohärente Bodenmasse graben, tragen sie weiter zur Formung des Bodengefüges bei.

2. *Zerteilung kohärenter Bodenmassen.* Die Zerteilung kohärenter Bodenmassen erfolgt einerseits durch Dehydratisierung und *Schwund* der Bodenkolloide, verursacht durch Austrocknung, Eisbildung oder Wasserentzug durch die Pflanzen, anderseits durch *Sprengung*, sei es durch Eisbildung, Wurzelwachstum oder Druck der Luft, die bei plötzlicher Benetzung in den Poren eingeschlossen und durch das mit großer Kraft in die Poren gesogene Wasser komprimiert wird, bis sie den «Behälter» sprengt.

Durch häufige Wiederholung dieser Prozesse wird die ganze Bodenmasse schließlich zu einzelnen Aggregaten zerteilt. Bei vollständiger Wiederaufquellung können die Aggregate wieder zusammenwachsen; die Schwächezonen bleiben aber bestehen, und beim Wiederaustrocknen treten wieder dieselben Aggregate hervor. Wird die Bindesubstanz durch die Austrocknung irreversibel entquellt (Humus, Sesquioxide und Kieselsäure), so entstehen vollständig wasserstabile Aggregate, die auch bei Nässe große Poren zwischen sich lassen.

D. Einfluß der Bodenbildungsfaktoren

1. *Muttergestein.* Das Muttergestein beeinflußt die Aggregierung des Bodens direkt durch seinen Gehalt an Bindesubstanz (Salze, Kalziumkarbonat, Sesquioxide, Kieselsäure, Tonminerale) und Koagulatorionen einerseits und durch den Gehalt an größeren Bodenkörnern anderseits. Indirekt wirkt das Muttergestein u. a. durch seinen Einfluß auf das Pflanzenwachstum: Je mehr organische Substanz produziert wird, desto besser die Aggregierung des Bodens.

2. *Klima.* Das Klima beeinflußt die Aggregierung des Bodens einmal durch seine Wirkung auf die Art und die Intensität der Verwitter-

rung. In trockenen Gebieten mit geringer Auswaschung und geringer Tonbildung ist das Kalziumkarbonat ein wichtiger Aggregierungsfaktor. Mit abnehmenden Niederschlägen rückt der Kalziumkarbonatanreicherungshorizont immer mehr an die Oberfläche des Bodens. In feuchten Gebieten mit starker Auswaschung sind die Sesquioxyde von größerer Bedeutung.

Sehr groß ist der Einfluß des Klimas auf die Aggregierung der Böden durch seine Wirkung auf die Produktion und den Abbau von organischer Substanz, d. h. auf die Humusbildung. Größte Mengen Humus bei intensivster Durchmischung mit dem mineralischen Material des Bodens sind am günstigsten. Dieser Fall trifft auf die Schwarzerden zu. Rohhumus, wie er in kalten Gebieten gebildet wird, vermag den Boden nicht zu aggregieren, auch wenn er in noch so großen Mengen aufgehäuft wird, wie dies zum Beispiel bei Podsolen der Fall ist.

Wechselnde Benetzung und Austrocknung fördern die Aggregierung, ebenso Gefrieren und Auftauen.

B a v e r hat eine positive Korrelation zwischen Bodenaggregierung und mittlerer Jahrestemperatur und Niederschlagsmenge gefunden.

3. *Organismen*. Algen und Pilze können mit ihren Fäden den Boden mechanisch verfestigen, höhere Pflanzen können dies durch ihr Wurzelwerk. Auch durch den Wasserverbrauch tragen die Pflanzen zur Aggregierung bei.

Am größten ist der Einfluß der Organismen durch die Lieferung organischer Substanz. Neben dem Streuematerial, das auf der Bodenoberfläche anfällt, erhält der Boden bedeutende Mengen organischen Materials von abgestorbenen Wurzeln und Bodenlebewesen. Viele organische Verbindungen des Bodens sind Produkte mikrobieller Synthese. Das Bodengefüge wird durch die Humusbildner nicht verbessert, sondern erst durch die echten Humusstoffe, die in biologisch aktiven Böden aus den Humusbildnern entstehen.

Größere Bodentiere, vorab Würmer, formen die Aggregate.

Die Bewirtschaftung des Bodens durch den *Menschen* ist für das Bodengefüge meist nachteilig: Sie verursacht Schwund des Humus, Verarmung an Nährstoffen, mechanische Zerstörung der Aggregate durch Geräte, Erhöhung der Erosion durch Bloßlegung. Auf der andern Seite muß der Mensch das Bodengefüge ständig zu verbessern suchen. Die Mittel dafür werden an anderer Stelle behandelt.

4. *Relief*. Das Relief beeinflußt das Bodengefüge indirekt durch die Modifikation des Lokalklimas, der Vegetation und des Wasserhaushaltes des Bodens. Kuppen trocknen rasch aus, Senken leiden eher an Überschuß von Wasser: Beides ist für die Aggregierung ungünstig. Abtrag und Aufschüttung durch Wind und Wasser sowie die Schwerkraft können die Aggregierung des Bodens verlangsamen oder verhindern.

5. Zeit. Gesteinsrohböden sind nicht gekrümelt. Alle Bodenbildungsprozesse — Verwitterung, Humusbildung und Verlagerungen — brauchen Zeit. Auch die Krümelung des Bodens braucht unter natürlichen Bedingungen Zeit. In jenen Bodentypen, die im Obergrund gut aggregiert sind, ist die Krümelung um so besser, je höher entwickelt die Böden sind. Dies ist zum Beispiel in Braunerden der Fall (vgl. Leutenecker, 1950; Richard, 1950). Mit der Podsolierung der Braunerde wird das günstige Gefüge zerstört.

IV. Das Bodengefüge verschiedener Bodentypen

Eine gute Vorstellung über Bildung und Form des Bodengefüges der wichtigsten zonalen Bodentypen vermittelt folgende schematische Darstellung von Bauer:

Gefüge aufgebaut aus:	Aggregaten	Aggregaten und Einzelteilchen	Einzelteilchen
Form der Aggregate:	kubisch	→ prismatisch → plattig	→ Einzelkornzerteilung
Dominierender Prozeß:	↑ Aggregierung	↑ Zerteilung	↑ Dispergierung
Bodentypen:	Schwarz- erde	Laterite Rot-, Gelb- und Braunerden	Wüstenböden Podsole

Humuskarbonatböden und Rendzinen können in diesem Schema zwischen Schwarzerden und Braunerden eingereiht werden, ebenso gewisse Niedermoore; Humussilikatböden und Hochmoore sind zu den Podsolen zu stellen (vgl. Bach, 1950; Frei, 1944; Leuenberger, 1950; Leutenecker, 1950; Richard, 1950).

V. Methoden zur Analyse des Bodengefüges

Für die *direkte* Analyse des Bodengefüges gibt es optische und mechanische Methoden.

Unter den *optischen* Methoden steht die makroskopische Beurteilung des Gefüges, die am gewachsenen Boden oder an einer «ungestörten» Bodenprobe vorgenommen wird, an erster Stelle. Mit einiger Erfahrung können damit sehr gute und umfangreiche Ergebnisse erzielt werden. Für die mikroskopische Betrachtung eignen sich vor allem Bodendünnschliffe. Auflicht, Durchlicht, polarisiertes Licht und Phasenkontrastbeleuchtung werden angewendet. Das Elektronenmikroskop hat schließlich auch den submikroskopischen Bau erschlossen; es können damit zum Beispiel Ton-Humus-Komplexe sichtbar gemacht werden.

Die *mechanischen* Methoden zur Bestimmung der Aggregatgröße beruhen auf Trocken- oder Naßsiebung oder auf Fraktionierung durch Sedimentation in ruhendem oder fließendem Wasser.

Für die Bestimmung der Gefügestabilität haben die Erdbaumechaniker eine ganze Reihe von Methoden und Geräten entwickelt. In der Bodenkunde begnügt man sich meist mit der Bestimmung der Beständigkeit gegenüber bewegtem Wasser, insbesondere Tropfen und Durchfluß.

Indirekt wird das Bodengefüge durch Messung des Wasser- und Lufthaushaltes bestimmt; hier ist nicht weiter darauf einzugehen (B u r g e r , 1922; B u e ß , 1950; Leutenegger, 1950; Übersicht über alle Methoden s. Soil Science, 1949).

VI. Bodengefüge und Bodenfruchtbarkeit

Das Bodengefüge beeinflußt die Bodenfruchtbarkeit in mannigfacher Weise (siehe besonders Shaw, 1952). Ein kompakter zementierter Boden bildet zum Beispiel ein *mechanisches Hindernis* für das Wurzelwachstum. In einem Boden mit sehr losem Einzelkorn- oder auch Krümelgefüge finden flachwurzelnde Pflanzen nicht genügend *Verankerungsmöglichkeit*. Lose Böden unterliegen zudem stark der *Erosion* durch Wind und Wasser, was eine Reduktion des Wurzelraumes bedeutet. Besonders wichtig ist der Einfluß des Bodengefüges auf den *Wasser- und Lufthaushalt*. Je feiner dispers die Bodeneinzelteilchen und je dichter gelagert sie sind, desto kleiner sind die einzelnen Poren und desto kleiner ist das ganze Porenvolumen. Die Luftkapazität ist im Extremfall gleich Null; Sauerstoff wird zum Minimumfaktor für das Pflanzenwachstum. Umgekehrt sind die Poren in einem sehr grobkörnigen Boden mit geringem Kolloidgehalt sehr weit; der Boden ist sehr durchlässig und trocknet leicht aus; Wasser begrenzt hier das Pflanzenwachstum. Optimale Verhältnisse herrschen in jenen Böden, die bei gemischter Körnung gut aggregiert sind: Dementsprechend findet man grobe und feine Poren, und Luft- und Wasserführung sind ausgeglichen. Dies ist der Fall beim Schwammgefüge der Schwarzerden und der besten Braunerden.

Das Bodengefüge beeinflußt den *Wärmehaushalt* eines Bodens indirekt über den Wasserhaushalt und die Wärmeleitfähigkeit. Die Wärmekapazität des Wassers ist etwa dreimal größer als jene der festen Bodensubstanz. Nasse Böden erwärmen sich langsamer als trockene; diese sind «warm», jene «kalt». Ein sehr lockerer, wasserarmer Boden leitet die Wärme wenig.

Über den Wasser-, Luft- und Wärmehaushalt beeinflußt das Bodengefüge auch das *Bodenleben*; biologisch aktive Böden sind gewöhnlich auch fruchtbar. Unter anaeroben Verhältnissen können nur einige

wenige Organismen leben; ihre Stoffwechselprodukte sind zum Teil giftig.

VII. Verbesserung des Bodengefüges

Durch die *Bodenbewirtschaftung* und die *Bodenbearbeitung* sucht man den Boden laufend so locker zu halten, daß die Pflanzen ungehemmt wachsen können. Eine dauernde Verbesserung des Bodengefüges wird durch die Bearbeitung aber nicht erreicht.

Bei der Wahl der *Düngemittel* achtet man darauf, dem Boden nicht zu viele Dispergatoren, sondern eher Koagulatoren zuzufügen.

Die beste Wirkung wird meist erzielt durch Zufuhr *organischer Substanz* (Mist, Gründüngung, «mulching»), die von den Bodenlebewesen leicht umgesetzt werden kann.

Zahlreich sind die Methoden zum Schutz gegen Erosion.

In der Forstwirtschaft versucht man den Boden und besonders das Bodengefüge vor allem durch standortsgemäße Bestockung und angemessene Wirtschaftsführung in günstigem Zustand zu erhalten oder zu verbessern; direkte Maßnahmen zur Bodenverbesserung werden nur in besonderen Fällen getroffen (B u r g e r , 1952).

In neuester Zeit werden auch Versuche mit *künstlichen Bodenkrümelungsmitteln* gemacht (S o i l S c i e n c e , 1952; D e u e l , 1952). Die Aggregierung eines Bodens wird zum Beispiel verbessert durch K-Silikat, Alaune, Zellulosedervative, Polysaccharide und Silicone. Das Krilium, Na-Polyakrylat oder Polymerisat aus Vinylazetat und Maleinsäureanhydrid, findet bereits praktische Verwendung. Die organischen Krümelungsmittel zeichnen sich alle dadurch aus, daß sie aus sehr langen Fadenmolekülen bestehen und mit sehr vielen aktiven Gruppen besetzt sind (Hydroxylgruppen, Karboxylgruppen, Aminogruppen).

Damit ein künstliches Krümelungsmittel für die Praxis taugt, muß es ungiftig sein für Pflanzen und Bodenlebewesen, es darf die Aufnehmbarkeit der Nährstoffe (besonders der Spurenelemente) nicht herabsetzen, und es soll im Boden einigermaßen resistent gegen Abbau sein.

Schluß

Durch die Forschungen der letzten Jahrzehnte sind unsere Kenntnisse über das Bodengefüge wesentlich vertieft worden. Viele Teilprobleme sind jedoch noch sehr wenig abgeklärt. Aus den obigen Ausführungen geht hervor, daß für ein Verständnis des Bodengefüges der Aufbau und die Eigenschaften der einzelnen Bodenbestandteile möglichst genau bekannt sein sollten. Am Agrikulturchemischen Institut der Eidgenössischen Technischen Hochschule haben sich seinerzeit W i e g - n e r und P a l l m a n n eingehend mit den kolloidchemischen Eigenschaften von Ton und Humus beschäftigt und dabei besonders die

Gesetzmäßigkeiten beim Ionenumtausch und bei der Koagulation erforscht (Wiegner, 1935; Pallmann, 1938, 1942).

In Fortsetzung der Arbeiten von Pallmann werden auch heute noch Konstitution und Eigenschaften der Ton- und Humusstoffe schweizerischer Böden untersucht. Die im Gang befindlichen Arbeiten seien kurz skizziert. Bei den Tonmineralien wird besonders die Oberflächenstruktur abzuklären versucht (G. Huber und R. Iberg). Systematische Untersuchungen haben die Art der Tonmineralien in den verschiedenen schweizerischen Böden zum Gegenstand (R. Iberg). Bei den Humusstoffen gilt die besondere Aufmerksamkeit ihrem Polysaccharidanteil (G. Zweifel) und ihrer Ionenselektivität (K. Hutschnecker und J. P. Cornaz). Zudem wird die Flockung und Aggregierung von Tonmineralien durch natürliche und synthetische hochmolekulare Verbindungen geprüft (J. Solms und G. Zweifel). Wir hoffen, daß diese Studien an den Einzelbestandteilen des Bodens auch einen Beitrag zur Kenntnis des Bodens als Ganzen, besonders seines Gefüges, liefern.

Résumé

La structure du sol

La structure du sol est définie par la disposition spatiale des particules et la porosité du sol. Dans un sol de structure favorable, les particules élémentaires sont associées en agrégats de forme et grandeur définies. La stabilité d'une telle structure dépend en premier lieu de la stabilité des agrégats à l'envers de l'action de l'eau.

La formation de la structure du sol est traitée tout d'abord au point de vue des matières qui favorisent une agrégation, telles que sels alcalins, gypse, calcaire, acide silicique, sesquioxides, argile, matières organiques, organismes, eau. Entre les forces de liaison et les processus qui amènent à une agrégation nous citons polycondensation, cristallisation, coagulation, adsorption, liaison mécanique. Forme et grandeur des agrégats sont le résultat de l'action des animaux dans le sol et de la dispersion des masses cohérentes par dégonflement. Un autre point de vue est l'influence des facteurs de formation du sol tels que roche mère, climat, organismes, relief topographique et temps.

La structure des types de sol les plus importants est esquissée par un schéma.

Quelques principes d'analyse de la structure du sol sont indiqués brièvement.

La structure du sol influence la fertilité par intermédiaire du régime de l'eau, de l'air et de la chaleur. La structure du sol peut être améliorée par traitement mécanique, chimique et biologique. Trad. J.-P. Cornaz

Literatur

- Bach, R.: Ber. Schweiz. Bot. Ges., **60**, 51—152 (1950).
Bauer, L.: Soil Physics. 2nd ed., New York 1948.
Buess, O.: Landw. Jahrb. Schweiz, **64**, 1—68 (1950).
Burger, H.: Mitt. Schweiz. Anst. forstl. Versuchsw., **13**, 3—221 (1922); **28**, 11—87 (1952).

- Demolon, A.*: La Dynamique du sol. 4^e éd., Paris 1948.
- Deuel, H.*: Schweiz. Landw. Monatsh., **28**, 392—422 (1950); **30**, 145—152 (1952).
- und *Hostettler, F.*: Experientia, **6**, 445—456 (1950).
- *Huber, G.*, und *Anyas-Weisz, L.*: Helv., **33**, 563—567 (1950).
- und *Solms, J.*: Kolloid-Z., **124**, 65—69 (1951).
- Frei, E.*: Ber. Schweiz. Bot. Ges., **54**, 267—346 (1944); Trans. 4th Int. Congr. Soil Sci., **1**, 46—48 (1950).
- Joffe, J. S.*: Pedology. New Brunswick, N. J., 1949.
- Kubiena, W.*: Micropedology. Ames, Iowa, 1938.
- Leuenberger, R.*: Diss., ETH, Zürich 1950.
- Leutenegger, F.*: Diss., ETH, Zürich 1950.
- Pallmann, H.*: Bodenk.-Forsch., **6**, 21—48 (1938); Erdbaukurs, ETH, Zürich 1938; Kolloid-Z., **101**, 72—81 (1942).
- Richard, F.*: Mitt. Schweiz. Anst. forstl. Versuchsw., **26**, 751—836 (1950).
- Russell, E. J.*, und *Russell, E. W.*: Soil Conditions and Plant Growth. 8th ed., London 1950.
- Schuylenborgh, J. van*: Diss., Wageningen 1947.
- Shaw, B. T.*: Soil Physical Conditions and Plant Growth. New York 1952.
- Soil Science*, **68**, 1—112 (1949); **73**, 419—452 (1952).
- Soil Survey*, Manual, Washington DC 1951.
- Wiegner, G.*: Trans. 3rd Int. Congr. Soil Science, **3**, 5—28 (1935).

MITTEILUNGEN · COMMUNICATIONS

Schulratspräsident Prof. Dr. Hans Pallmann 50jährig

Am 21. Mai feiert der Präsident des Schweizerischen Schulrates, Herr Professor Dr. Hans Pallmann, der seit 1947 dem Schweizerischen Forstverein als Mitglied angehört, seinen 50. Geburtstag. Der leider inzwischen allzu früh verstorbene Eidg. Oberforstinspektor Dr. E. Heß hat bereits anlässlich der Wahl zum Nachfolger von Herrn Schulratspräsident Prof. Dr. Rohr in der Februarnummer 1949 dieser Zeitschrift eingehend die großen Verdienste Prof. Pallmanns für unser Forstwesen gewürdigt. Die starke Beachtung, welche heute in unserer waldbaulichen Ausbildung und Praxis der Bodenkunde geschenkt wird, ist vor allem auf die begeisternden Vorlesungen und Vorträge Pallmanns zurückzuführen. Mit seinen klaren, grundlegenden Veröffentlichungen über Waldböden hat er viel zum hohen Ansehen beigetragen, welches unsere Forstwissenschaft im Auslande genießt.

Auch in seinem hohen Amt als Präsident des Schweizerischen Schulrates hat Professor Pallmann seine Verbundenheit mit dem Forstwesen bewahrt. Bei jeder sich bietenden Gelegenheit tritt er ein für die Hebung unseres Berufsstandes, für die Verbesserung der forstlichen Ausbildung und den Ausbau der forstlichen Forschung. Die forstliche Versuchsanstalt verdankt seinem Verständnis, daß sie hoffentlich bald in einem eigenen Neubau ein würdiges Heim finden darf. Auch bei der Projektierung eines Neubaues für die Abteilungen für Land- und Forstwirtschaft der ETH hat Schulratspräsident Pallmann den dringenden Bedürfnissen der Forstschule besonders Rechnung getragen.