

Unsichtbar wirksam

Bodenmikroaggregate: kleine Strukturen mit großer Wirkung

In der Bodenforschung spielen Mikroaggregate eine besondere Rolle. Sie haben eine komplexe innere Architektur in der mikrobielle, biogeochemische und physikalische Prozesse in Wechselwirkung stehen, die bisher noch sehr wenig untersucht, aber von fundamentaler Bedeutung für die Funktionsfähigkeit von Böden sind.

Wissenschaftler vom Institut für Bodenkunde versuchen daher, einen Beitrag zum mechanistischen Verständnis der Bildung und Funktion von Mikroaggregaten zu leisten.



Böden sind strukturierte poröse Medien, die sich durch eine komplexe räumliche Anordnung von festen mineralischen und organischen Bestandteilen mit dazwischen liegenden Hohlräumen (Poren) auszeichnen. Der Porenraum wird mit variablen Anteilen von Wasser und Gas erfüllt, spielt bei Speicherung, Transport und Umwandlung von Nähr- und Schadstoffen im Boden eine zentrale Rolle und dient als Lebensraum (Habitat) für eine Vielzahl von Bodenorganismen. Bodenstrukturen sind sehr heterogen und bilden sich auf unterschiedlichen raumzeitlichen Skalen (Minuten bis Jahrzehnte

beziehungsweise Nanometer bis Meter). Ihr dreidimensionaler Aufbau ist das Ergebnis von bodenbildenden abiotischen und biotischen Prozessen, die unterschiedliche Mineralphasen und organische Substanzen miteinander „zementieren“ und „verkleben“ und Böden dadurch Stabilität verleihen (Abb. 1). Allgemein wird der Vorgang der Bodenstrukturentwicklung als *Aggregation* bezeichnet. Die zeitliche Entwicklung der Bodenstruktur und ihre Abhängigkeit vom Ausgangsgestein ist ein wesentlicher Faktor für die Funktionsfähigkeit von Böden in Ökosystemen. Technische Neuerungen

der vergangenen Jahre vor allem im Bereich der bildgebenden und mikrospektroskopischen Verfahren (Röntgen- μ CT, NanoSIMS, XPS, etc.) lassen heute neue Einblicke in die Welt der Aggregate zu. Die räumliche und qualitative Analyse von mikroskopisch kleinen Strukturen trägt dazu bei, die in Porenräumen und an Partikelgrenzflächen ablaufenden Prozesse besser zu quantifizieren und ihre Auswirkung auf Stoffkreisläufe zwischen Böden und Atmosphäre zu verstehen.

In der Bodenforschung spielen Mikroaggregate ($< 250 \mu\text{m}$) eine besondere Rolle. So sind

Abbildung 1
Rasterelektronenmikroskopie-Aufnahme eines Mikroaggregats mit primären und sekundären Mineralen, die durch zementierende Substanzen stabilisiert sind.

Quelle: Dr. Zeismann & Dr. Uteau

zum Beispiel die Wasser- und Kohlenstoffspeicherung, biogeochemische Reaktionen und Transportfunktionen sehr wesentlich von den Mikrostrukturen in diesen Aggregaten abhängig. Während in den vergangenen Jahrzehnten große Fortschritte im Hinblick auf das Verständnis der biologischen Bildung, Zusammensetzung und Funktion von Makroaggregaten erzielt wurde, ist noch wenig über die Grundbausteine der Mikroaggregate bekannt. Vor allem die Mikrostrukturen mit ihren 3-dimensionalen Porennetzwerken und darin ablaufende Transportprozesse und die Mechanismen, die für die Stabilisierung von Mikroaggregaten verantwortlich sind, wurden bisher noch wenig erforscht. Am Institut für Bodenkunde sind die AG Bodenchemie und die AG Bodenbiophysik an einer DFG-geförderten Forschungsgruppe (MADSoil: MicroAggregate Development in Soil) beteiligt, die sich mit der Fragestellung der Entstehung, Stabilisierung und dem komplexen Aufbau von Mikroaggregaten auseinandersetzt. Mit einem interdisziplinären Ansatz aus dem Blickwinkel der Bodenchemie, Bodenbiologie, Bodenphysik und Modellierung werden Bildungsmechanismen und Funktionen von Mikroaggregaten (zum Beispiel Wasser- und Kohlenstoffspeicherung, Lebensraum für Mikroorganismen, etc.) aufgeklärt.

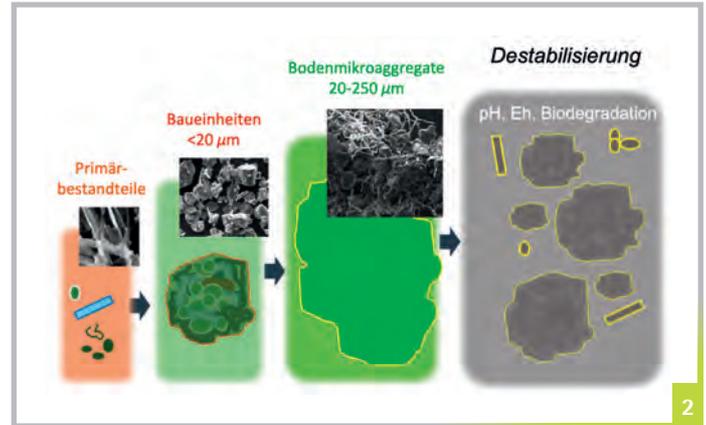
Wie entstehen Aggregate?

Das derzeitige Wissen über Bildung und strukturelle Organisation von Bodenaggregaten basiert auf dem Konzept der Aggregathierarchie, bei dem kleinste Baueinheiten ($< 20 \mu\text{m}$) zu Mikroaggregaten ($20\text{--}250 \mu\text{m}$) und Makroaggregaten ($> 250 \mu\text{m}$) sukzessive zusammengesetzt sind (Abb. 2). Unsere Grundannahme für die Bildung von Baueinheiten

ist, dass die Aggregation initial durch Ladungsunterschiede der beteiligten Reaktionspartner, sogenannte „Aggregatbildner“, gesteuert wird. Neben verschiedenen organischen Stoffen gelten Carbonate, Fe- und Al-Oxide, kieselige Phasen sowie Tonminerale hier als die wichtigsten anorganischen Aggregatbildner. Oxide ermöglichen aufgrund hoher sogenannter Ladungsnulldunkte die Sorption von negativ geladener organischer Substanz oder die Reaktion mit permanent negativ geladenen Tonmineralen. Auch kann negativ geladene organische Substanz über Brücken durch mehrwertige Kationen an Tonminerale gebunden werden. Neben Sorptionsvorgängen kann Mikroaggregation auch durch Kopräzipitation verursacht werden, zum Beispiel von organischer Substanz und Tonmineralen. Grundsätzlich initiieren sowohl organische Substanz-Mineral- als auch Mineral-Mineral-Wechselwirkungen den Aufbau größerer Bodenstrukturen und damit die Prozesse der Mikroaggregatbildung. Bei den Mineral-Mineral-Wechselwirkungen haben die Kanten der Tonminerale, die (ähnlich wie die Fe- und Al-Oxide) eine pH-abhängige Oberflächenladung aufweisen, eine Schlüsselstellung für die Anordnung der Aggregatbildner und entstehende Mikrostrukturen. Diese werden derzeit in Laborexperimenten an der LUH und mit Modellierungsansätzen am Lehrstuhl für Angewandte Mathematik der FAU Erlangen-Nürnberg (Dr. Prechtel / Dr. Ray) gemeinsam untersucht (Abb. 3).

Aggregate als Senke für Kohlenstoff

Viele Poren in Mikroaggregaten sind für Mikroorganismen nicht zugänglich. Die im Inneren der Aggregate eingeschlossene organische Subs-



tanz liegt daher aufgrund von physikalischem Ausschluss vor mikrobiellem Abbau geschützt vor. Mikroaggregate werden deshalb als langfristige Kohlenstoffspeicher diskutiert mit Verweildauern des darin gespeicherten Kohlenstoffs von teilweise mehreren Hundert Jahren. Sie nehmen damit eine wichtige Rolle für die Kohlenstoffsequestrierung, also der langfristigen Stabilisierung der organischen Substanz in Böden ein.

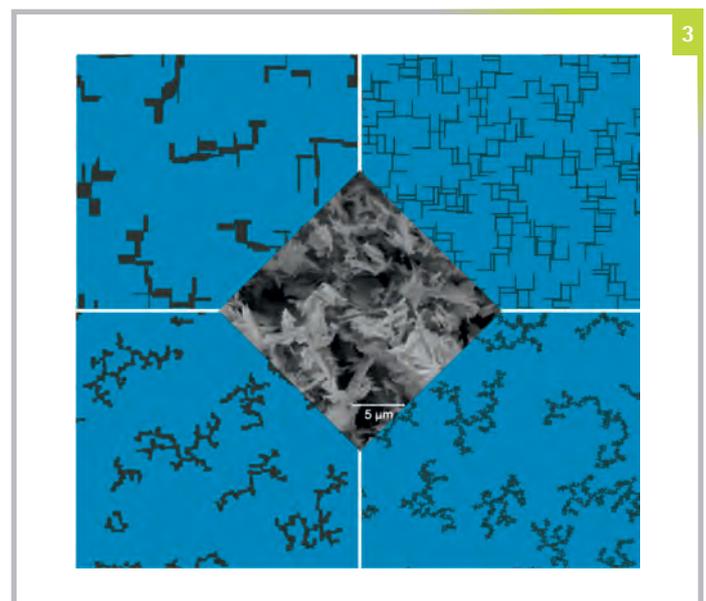
Grundsätzlich ist der Prozess der Aggregierung reversibel, das heißt bereits gebildete Aggregate können wieder zerfallen und dadurch Oberflächen, die zuvor nicht für Mikroorganismen erreichbar waren,

Abbildung 2
Hierarchischer Aufbau von Mikroaggregaten aus Primärbestandteilen (Minerale, organische Substanz, Mikroorganismen) die sich über kleine Baueinheiten zu großen Bodenmikroaggregaten zusammensetzen.

Quelle: Robert Mikutta

Abbildung 3
Simulation der Mikromorphologie von aus plättchenförmigen Tonmineralen zusammengesetzten Baueinheiten der Bodenmikroaggregate im Vergleich zu einer elektronenmikroskopischen Aufnahme.

Quelle: verändert nach Zech et al., 2020



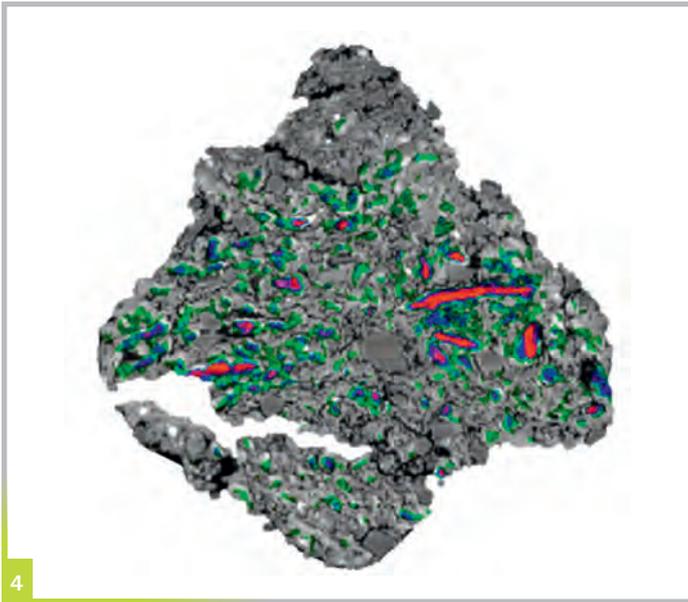


Abbildung 4
Räumlich heterogene Verteilung der organischen Substanz in einem Bodenaggregat (5 mm Durchmesser). Rote und blaue Farben zeigen partikuläre organische Substanz und grüne Farben dispers verteilte organische Substanz. Die grau schattierten Bereiche sind frei von organischer Substanz.

Quelle: aus Peth et al. 2014

zugänglich machen. Hierbei gilt, dass Mikroaggregate im Vergleich zu Makroaggregaten wesentlich stabiler sind. Man spricht allgemein von „Aggregat-Turnover“ und meint einen Zyklus von Bildung, Zerfall und Neubildung. Wie lange ein Zyklus dauert ist abhängig von der mineralogischen Zusammensetzung der Böden, dem Gehalt und der Qualität der organischen Substanz, der Bodenfeuchte und weiterer Faktoren, die die biologisch gesteuerten Aggregierungsmechanismen beeinflussen. Allerdings gehen die wenigen Studien zum Aggregat-Turnover und zur Verweildauer von organischer Substanz in Mikroaggregaten sowie den

zugrunde liegenden Prozessen sehr weit auseinander, so dass hier noch großer Forschungsbedarf besteht. So ist beispielsweise noch zu klären, wie die räumlich heterogene Verteilung der organischen Substanz (Substrat) im Porenraum, die Trennung von Substrat und Mikroorganismen und die mikroskaligen Transportprozesse von Wasser und Gas in den Porennetzwerken die Mineralisationsprozesse steuern. *Abbildung 4* zeigt die heterogene Verteilung von organischer Substanz im Boden, die mit einer Osmium-Staining Methode in röntgentomographischen Untersuchungen *in situ* lokalisiert wurde.

Die Architektur von Aggregaten

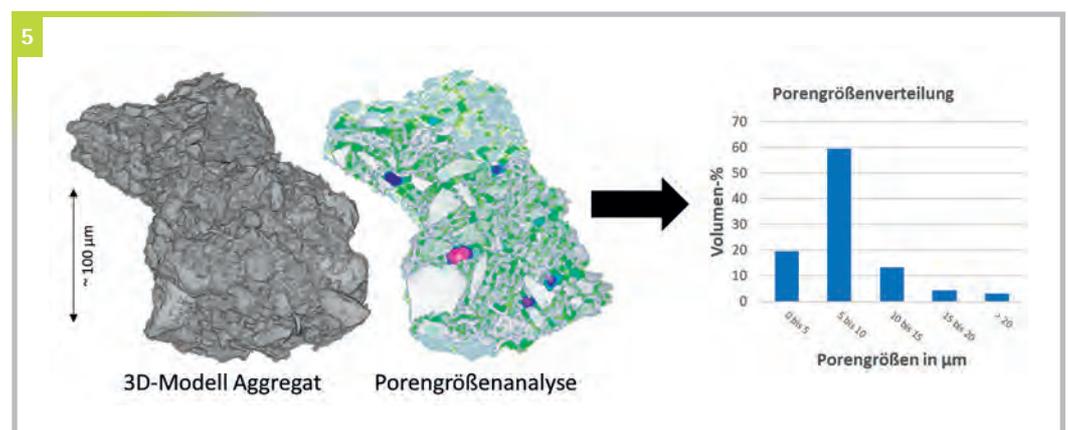
Da den Mikroaggregaten eine besondere Rolle bei der Speicherung von Kohlenstoff, Wasser und Nährstoffen, sowie als Lebensraum für Mikroorganismen zukommt, ist es von besonderer Bedeutung, deren Architektur zu studieren, um ihre Funktionen und Eigenschaften besser zu verstehen. Vor allem die Konnektivität des Porenraums und die Zugänglichkeit von inneren Oberflächen steuern maßgeblich die Prozessraten biogeochemischer Reaktionen und Austauschprozesse. Wegen ihrer geringen Größe und ihrer opaken Mineralbestandteile war es bisher kaum möglich, direkte Beobachtungen

an der dreidimensionalen Morphologie von Porenräumen in Mikroaggregaten vorzunehmen, sodass die meisten Erkenntnisse sich auf Modellierungen stützen. Seit einigen Jahren eröffnen modernste bildgebende Verfahren (zum Beispiel hochauflösende Röntgen-CT) die Möglichkeit, diese kleinsten Struktureinheiten in ihrem natürlichen Zustand auf ihre Architektur hin zu untersuchen (*Abb. 5*). Der Porenraum im Innern von Mikroaggregaten unterscheidet sich in einigen Belangen vom Porenraum außerhalb der Aggregate. Vor allem die kleineren Porendurchmesser im Vergleich zum sie umgebenden Boden sorgen dafür, dass sich im Aggregatinneren spezielle Gemeinschaften von Mikroorganismen entwickeln können, die dort besondere Bedingungen, die dort besondere Bedingungen oder Nischen vorfinden, wie den Schutz vor Fressfeinden (beispielsweise Nematoden) oder aber spezielle Konzentrationen von Sauerstoff und Stickstoff (anaerobe Bedingungen). In Abhängigkeit der Aggregatgröße finden sich daher in engem Abstand zueinander sehr unterschiedliche mikrobielle Gemeinschaften im Boden, die entsprechend unterschiedliche Bodenfunktionen regulieren.

Stabilität von Aggregaten

Wie lange Kohlenstoff in Mikroaggregaten gespeichert wer-

Abbildung 5
Links: 3D-Modell eines Mikroaggregats mit 34 % Tongehalt und einer Scan-Auflösung von 0,55 µm. Mitte: Anschnitt der gleichen Probe mit Porengrößenverteilung (dunkle Farben repräsentieren größere Porendurchmesser). Rechts: Histogramm der verschiedenen Porengrößenklassen innerhalb dieses Aggregats. Quelle: Felde et al., unveröffentlicht



den kann und ob sich spezialisierte Gemeinschaften von Mikroorganismen auf Dauer etablieren können, hängt nicht zuletzt von der mechanischen Stabilität dieser Aggregate ab. Die Stabilität wird vor allem gesteuert von der Textur und der An- beziehungsweise Abwesenheit der oben erwähnten Klebe- und Kittsubstanzen. Da die mechanische Belastbarkeit experimentell nur sehr schwer zu ermitteln ist, gibt es auf diesem Gebiet so gut wie noch keine Erkenntnisse. Seit kurzem arbeitet das Institut für Bodenkunde mittels einer hochauflösenden Materialprüfmaschine daran, die Einflussfaktoren der Aggregatstabilität in natürlichen und künstlichen Systemen zu quantifizieren.

Mikroaggregate haben eine komplexe innere Architektur in der mikrobielle, biogeochemische und physikalische Prozesse in Wechselwirkung stehen, die bisher noch sehr wenig untersucht sind. Das Verständnis der Prozesse an

mikroskopischen Grenzflächen und in kleinsten Porenräumen ist von fundamentaler Bedeutung für die Funktionsfähigkeit von Böden. Auch mit Blick auf den globalen (Klima-)Wandel ist eine grundlegende Erforschung von diesen mikroskopischen Strukturen in Böden hochrelevant. Das Institut für Bodenkunde versucht mit Hilfe modernster spektroskopischer und röntgenomographischer Verfahren einen Beitrag zum mechanistischen Verständnis der Bildung und Funktion von Mikroaggregaten zu leisten.

Danksagung

Wir bedanken uns bei der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die finanzielle Förderung unserer Projekte im Rahmen der Forschergruppe RU 2179 „MAD Soil - Microaggregates: formation and turnover of the structural building blocks of soils“. Weitere Infos unter <https://www.madsoil.uni-jena.de/>

Literatur

- Peth, S., Chenu, C., Leblond, N., Mordhorst, A., Garnier, P., Nunan, N., Pot, V., Ogurcek, M. & Beckmann, F. 2014. Localization of soil organic matter in soil aggregates using synchrotron-based X-ray microtomography. *Soil Biology and Biochemistry*, 78, 189–194. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2014.07.024>
- Totsche, K. U., Amelung, W., Gerzabek, M.H., Guggenberger, G., Klumpp, E., Knief, C., Lehndorff, E. u. a. 2018. „Microaggregates in Soils“. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 181, 104–136. <https://doi.org/10.1002/jpln.201600451>
- Zech, S., Dultz, S., Guggenberger, G., Prechtel, A., Ray, N. (2020). „Microaggregation of Goethite and Illite Evaluated by Mechanistic Modeling“. *Applied Clay Science* 198: 105845. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2020.105845>



Prof. Dr. Stephan Peth

Jahrgang 1972, leitet am Institut für Bodenkunde die Arbeitsgruppe Bodenbiophysik. Seine Arbeitsschwerpunkte sind Bodenstruktur, Bildanalyse (Tomographie), Wurzel-Boden-Interaktionen und Bodenmechanik. Kontakt: peth@ifbk.uni-hannover.de



Dr. Vincent Felde

Jahrgang 1982, ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Bodenkunde. Seine Arbeitsschwerpunkte sind Bodenstruktur, Bildanalyse (Tomographie) sowie Biologische Bodenkrusten und Desertifikation. Kontakt: felde@ifbk.uni-hannover.de



PD Dr. Stefan Dultz

Jahrgang 1960, ist Privatdozent und wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Bodenkunde. Seine Arbeitsschwerpunkte sind feine Partikel im System Boden. Kontakt: dultz@ifbk.uni-hannover.de



Prof. Dr. Georg Guggenberger

Jahrgang 1963, ist Leiter der Arbeitsgruppe Bodenchemie am Institut für Bodenkunde. Seine Arbeitsschwerpunkte sind Stabilisierungsprozesse organischer Substanz, Permafrostböden sowie Pflanze-Mikroorganismen-Boden-Interaktionen. Kontakt: guggenberger@ifbk.uni-hannover.de