



Executive Stakeholder Summary

Projektnummer	406840_143061
Titel	Regeneration verdichteter Böden
Projektleiter:	Thomas Keller, Agroscope
Weitere Projektverantwortliche	Dani Or, ETH Zürich Stanislaus Schymanski, ETH Zürich Peter Weisskopf, Agroscope Achim Walter, ETH Zürich

Beitrag zur thematischen Synthese:

<input checked="" type="checkbox"/> Boden und Nahrungsmittelproduktion	<input checked="" type="checkbox"/> Boden und Umwelt	<input type="checkbox"/> Raumentwicklung	<input type="checkbox"/> Bodendaten, Methoden und Instrumente	<input type="checkbox"/> Bodenpolitik
------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------	------------------------------------------	---------------------------------------------------------------	---------------------------------------

Ort, Datum: Zürich, 22.12.2016

Hintergrund

Landwirtschaftliche Maschinen können den Boden so stark belasten, dass er verdichtet wird. Dies bedeutet, dass Porenvolumen verloren geht und die Bodenstruktur – die räumliche Anordnung der Bodenbestandteile und Hohlräume (Poren) sowie die Stabilität dieses komplexen, dreidimensionalen, delikaten Gebildes – verändert wird. Wichtige Bodenfunktionen wie Wasser- und Gastransporteigenschaften und der Lebensraum für Bodenorganismen werden beeinträchtigt, inklusive Pflanzenwachstum. Die Entwicklung in der modernen Landwirtschaft hin zu grösseren und schwereren Maschinen führt dazu, dass der Boden buchstäblich immer stärker unter Druck gesetzt wird.

Die ökologischen und ökonomischen Folgekosten einer Bodenverdichtung sind direkt abhängig davon, wie schnell sich ein Boden von einer Verdichtung erholen kann. Die ökologischen Kosten ergeben sich aus der durch die Verdichtung verringerten Ökosystemleistung des Bodens, während sich die direkte ökonomische Kosten durch kleinere Pflanzenerträge oder erhöhte Energieeinsätze für Bodenbearbeitung und Düngung ergeben. Wichtig in diesem Zusammenhang ist die Erkenntnis, dass der Schaden einer Bodenverdichtung nach dem Verdichtungsereignis entsteht und sich die Kosten so lange akkumulieren, bis sich der Boden wieder vollständig von der Verdichtung erholt hat. Um die Kosten einer Verdichtung abschätzen zu können, sind Kenntnisse über Art, Intensität und Dauer der wirksamen Regenerationsprozesse nötig. Während der Verdichtungsprozess relativ gut untersucht ist, ist noch zu wenig bekannt, wie schnell sich die Bodenstruktur von einer Verdichtung erholt und welche Mechanismen dies wie beeinflussen. Klar ist, dass sich die beiden Prozesse Verdichtung und Regeneration auf völlig unterschiedliche Zeitskalen beziehen. Kann ein Boden innerhalb von Sekunden verdichtet werden, erfolgt die Regeneration viel langsamer und erstreckt sich über Jahre, Jahrzehnte oder sogar Jahrhunderte.

Ziel

Das übergeordnete Ziel des Projekts «Bodenverdichtung» bestand darin, die Regeneration der Bodenstruktur nach einem Verdichtungsereignis sowie die wichtigsten biophysikalischen Mechanismen, die zur Regeneration von verdichteten Bodenstrukturen beitragen, zu untersuchen. Dazu wurde an der Agroscope Reckenholz/Zürich der Langzeitfeldversuch «Soil Structure Observatory (SSO)» eingerichtet. Er erlaubt, die Entwicklung der Bodenstruktur und der Bodenfunktionen nach einem Verdichtungsereignis im Feld in räumlichen Skalen vom Bodenkrümel (mm) bis zur Parzelle (ha) über Jahre zu beobachten und zu messen. Die Erhebungen im Feld wurden ergänzt mit Laborexperimenten, um die Mechanismen, die die Bodenstruktur fördern, insbesondere Pflanzen-Boden-Interaktionen und Regenwurmbioturbation im Detail zu studieren. Des Weiteren wurden Modelle entwickelt, die die Einflussfaktoren und Mechanismen der Bodenstrukturentwicklung (z. B. Bioturbation) beschreiben.

Resultate

Die bisher vorliegenden Daten aus dem Langzeitfeldversuch «Soil Structure Observatory (SSO)» bestätigen, dass die Regeneration verdichteten Bodens ein langsamer Prozess ist. Das initiale Verdichtungsereignis im März 2014 hat eine Verdichtung bis auf rund 0.5 m Bodentiefe hervorgerufen. Die Verdichtung zeichnet sich aus durch eine Verringerung der Porosität, verringertem Transportvermögen für Wasser und Gase sowie erhöhten mechanischen Eindringwiderstand. Diese verdichtungsbedingten Verschlechterungen des bodenphysikalischen

Zustandes hatten einen direkten Einfluss auf die Wurzelentwicklung von Pflanzen und deren Ertrag. Wir konnten zeigen, dass die Pflanzen im verdichteten Boden weniger Wurzeln entwickeln und weniger tief in den Boden eindringen können. Die veränderten bodenphysikalischen Zustände führen zu veränderter Wurzelanatomie, mit generell dickeren Wurzeln und mehr und grösseren Aerenchymen, den gewebeinternen Strukturen zum Austausch von Sauerstoff innerhalb der Pflanze. Beeinträchtigte Bodenfunktionen wie Wasser- und Gasttransportvermögen, beispielsweise gesättigte Wasserleitfähigkeit, Gasdiffusivität, oder mechanischer Eindringwiderstand, haben sich in den ersten zwei Jahren nach der Verdichtung nur wenig verbessert. Aufgrund der noch relativ kurzen Versuchsdauer ist es zurzeit noch verfrüht, Regenerationszeiten abzuschätzen. Generell nimmt die Regenerationsrate von Bodenfunktionen mit der Bodentiefe ab, weil wichtige Prozesse wie Temperatur- und Wassergehaltsschwankungen sowie biologische Aktivität, die Regeneration fördern. Bodenbearbeitung beschleunigt zwar die Regeneration, hebt eine Bodenverdichtung aber nicht sofort auf. Zudem ist die Bearbeitungstiefe limitiert, während die Verdichtung häufig – so auch im SSO – bis in den Unterboden reicht. Im SSO werden verschiedene Bewirtschaftungsverfahren – Schwarzbrache, Dauerwiese, Fruchtfolge mit und ohne Bodenbearbeitung – getestet, die nach der initialen Verdichtung in unterschiedlichem Mass Einfluss auf die Regeneration der Bodenstruktur nehmen. Wegen der noch kurzen Versuchsdauer sind jedoch, mit Ausnahme des Effektes der Bodenbearbeitung, keine grossen Unterschiede in Bezug auf die Regeneration von Bodenfunktionen messbar. Der SSO ist als Langzeitversuch gedacht und wird in den kommenden Jahren wertvolle Daten zum weiteren Regenerationsverlauf liefern.

Die Experimente im Labor und in der Klimakammer führten zu wertvollen neuen Erkenntnissen in Bezug auf Wurzel-Boden-Interaktionen verschiedener Kulturpflanzen. So zeigten unsere Studien, dass Pflanzen und Wurzeln in Topfversuchen im Labor ähnlich auf Bodenverdichtung reagieren wie Pflanzen, die im Feld wachsen. Dies ist eine wichtige Erkenntnis, da Laborversuche unter kontrollierten Bedingungen durchgeführt werden können und es ermöglichen, in kürzerer Zeit viel mehr Faktoren (Bodenbedingungen, Pflanzen, Sorten) zu untersuchen, was beispielsweise für die Züchtung von Vorteil ist. Wir konnten zeigen, dass die Anzahl der Wurzeln eine entscheidende Grösse für die oberirdische Entwicklung einer Pflanze ist und die Wurzelwachstumsrate stark von der Geometrie der Wurzelspitze abhängt. Damit könnten in Zukunft verdichtungstolerante Sorten von Kulturpflanzen gezüchtet werden, die die Möglichkeit bieten, die Regeneration von verdichtetem Boden zu beschleunigen, weil sie besser und schneller in verdichtetem Boden wachsen können. Des Weiteren konnten wir zeigen, dass künstlich erzeugte Makroporen durch Pflanzen aktiv genutzt werden. Die Wurzeln wachsen in Richtung dieser Poren und nutzen diese, da sie dort schneller wachsen können und darin Sauerstoff besser verfügbar ist. Sowohl in Labor- als auch in Feldversuchen hatten diese Poren einen positiven Einfluss auf die Biomasseproduktion.

Sowohl Wurzeln wie auch Regenwürmer leisten einen wichtigen Beitrag bei zur Entwicklung der Porenstruktur eines Bodens, speziell in Bezug auf die Regeneration nach einer (starken) Verdichtung. Intensive Studien und Modellentwicklungen zur Mechanik von Bioturbation durch Wurzeln und Regenwürmer lieferten neue Erkenntnisse über den Energieaufwand für das Wachstum von Wurzeln und die Fortbewegung von Regenwürmern als Funktion der physikalischen sowie mechanischen Bodeneigenschaften und der Wachstums- beziehungsweise Fortbewegungsgeschwindigkeit. Wurzeln können einen rund zehnmals höheren Druck erzeugen als Regenwürmer, jedoch ist die Wachstumsgeschwindigkeit von Wurzeln rund zehnmals kleiner als die Fortbewegungsgeschwindigkeit von Regenwürmern. Die entwickelten Modelle erlauben es, den Energieaufwand für Bioturbation durch Wurzeln und Regenwürmern zu berechnen. Die Modelle wurden mit experimentellen Penetrationstests verifiziert. Für das Durchdringen des Bodens

brauchen Regenwürmer bei gleichem Durchmesser mehr Energie als Wurzeln, da sie sich schneller fortbewegen. Wurzeln können zudem in trockeneren Boden eindringen als Regenwürmer, da sie einen höheren Druck erzeugen können. Für ihre Fortbewegung im Boden verbrauchen Regenwürmer einen ansehnlichen Teil des jährlich in den Boden eingetragenen organisch gebundenen Kohlenstoffs als Energiequelle.

Die Erkenntnisse aus dem Projekt tragen zu einem besseren Verständnis von biophysikalischen Prozessen im Boden bei und helfen abzuschätzen, wie schnell sich ein Boden von einer Verdichtung erholen kann.

Bedeutung für die Forschung

Der SSO-Langzeitfeldversuch bietet eine in dieser Form einzigartige Möglichkeit, die zeitliche Entwicklung der Bodenstruktur und von ihr abhängiger Bodenfunktionen nach einer Verdichtung für verschiedene Bewirtschaftungsformen unter Feldbedingungen zu beobachten und erlaubt es, Regenerationsraten zu bestimmen. Die Daten aus dem SSO tragen bei zu verbesserten Kenntnissen über die Entwicklung der Bodenstruktur im Allgemeinen und die Regenerationsfähigkeit von Böden nach Verdichtung im Speziellen. Diese Erkenntnisse sind unentbehrlich für die Quantifizierung von Verdichtungsschäden.

Wir haben neue Erkenntnisse gewonnen, wie Wurzeln und Wurzelsysteme auf Bodenverdichtung reagieren, wie die Wurzeln mit dem Boden interagieren, welche Wurzeigenschaften das Wurzelwachstum beeinflussen sowie welchen Einfluss dies auf die oberirdische Pflanzenentwicklung hat. Wir haben Modelle entwickelt, die die Mechanik der Bioturbation durch Wurzeln und Regenwürmer beschreiben, und die es uns erlauben, den Energiebedarf für Wurzelwachstum und Regenwurmfortbewegung abhängig von mechanischen Bodeneigenschaften und der Eindringgeschwindigkeit zu berechnen. Dies erlaubt es uns zum Beispiel, die Bioturbationsleistung von Regenwurmpopulationen aufgrund der vorhandenen Energie (organisch gebundener Kohlenstoff im Boden) zu schätzen.

Bedeutung für die Praxis

Bodenverdichtung ist eines der grössten Probleme in der modernen Landwirtschaft und eine Bedrohung für die Fruchtbarkeit der Böden. Unsere Studien zeigen, dass sich die Bodenstruktur nach einer Verdichtung nur langsam regeneriert. Obwohl der Langzeitfeldversuch «Soil Structure Observatory» (SSO) noch keine genauen Aussagen über die Regenerationsdauer zulässt, zeigen die bisherigen Daten, dass die Regeneration Jahre bis Jahrzehnte in Anspruch nimmt. Während die Verdichtung in Sekunden erfolgt, dauert die anschliessende Regeneration des Verdichtungsschadens ungleich länger und erstreckt sich mitunter über Generationen. Wichtig ist die Erkenntnis, dass die Folgekosten einer Bodenverdichtung nach dem Verdichtungsereignis sich so lange akkumulieren, bis sich der Boden wieder vollständig von der Verdichtung erholt hat. Die verschiedenen Bewirtschaftungsformen im SSO (Schwarzbrache, Dauerriese, Fruchtfolge mit und ohne Bodenbearbeitung) werden Hinweise geben, wie die Regeneration der Bodenstruktur und der davon abhängigen Bodenfunktionen allenfalls beschleunigt werden kann. Der SSO zeigt, dass Bodenbearbeitung die Regeneration beschleunigt, aber eine Verdichtung nicht vollständig aufheben kann. Die Detailstudien zu Wurzel-Boden-Interaktionen und zur Bioturbation durch Wurzeln und Regenwürmer zeigen, dass genotypische Wurzeigenschaften verantwortlich dafür sind, wie sich das Wurzelsystem entwickelt und wie schnell Wurzeln auch in verdichtetem Boden wachsen können. Dies eröffnet neue Möglichkeiten für die Züchtung von bodenverdichtungs-

toleranten Sorten, die in verdichteten Böden nicht nur besser wachsen können, sondern dadurch auch die Regeneration von verdichtetem Boden beschleunigen. Die entwickelten Modelle erlauben es, abzuschätzen, wieviel Bioturbation durch Wurzeln und Regenwürmer in Abhängigkeit der mechanischen Bodeneigenschaften möglich ist, was wiederum Rückschlüsse auf die Regenerationsdauer von verdichtetem Boden erlaubt.

Empfehlungen

Unsere Studien bestätigen, dass Bodenverdichtungen wenn immer möglich vermieden werden sollten, da die Regeneration von verdichtetem Boden ungleich viel länger dauert (Größenordnung Jahre bis Jahrzehnte) als ein Verdichtungsereignis (Sekunden). Bodenbearbeitung hilft zwar die Regeneration zu beschleunigen, speziell hinsichtlich des Pflanzenertrags, behebt aber die Verdichtungsfolgen für verschiedene Bodenfunktionen nicht unmittelbar. Zudem kann der Boden auch unterhalb der Bearbeitungstiefe verdichtet werden (Unterbodenverdichtung).

Künstlich produzierte Bodenporen können die Pflanzenproduktivität in verdichtetem Boden erhöhen, da Wurzeln durch diese Poren wachsen und die Poren die Bodenbelüftung verbessern. Dies könnte neue Wege für schonendere Bodenbearbeitungsmethoden eröffnen.

Die Züchtung sollte auf bodenverdichtungstolerante Pflanzensorten ausgerichtet werden. Diese könnten nicht nur die Ertragseinbussen verringern, sondern auch die Regeneration der Bodenstruktur vorantreiben. Unsere Studien geben erste Hinweise auf Wurzeleigenschaften, welche die Wurzelwachstumsraten positiv beeinflussen. Weitere Forschungsarbeiten sind aber nötig.

Bioturbation durch Regenwürmer schafft neue kontinuierliche Poren im Boden und verbessert dadurch die Durchlüftung und Infiltration des Bodens. Dies setzt jedoch voraus, dass der Boden im feuchten Zustand ist, da Regenwürmer nur einen relativ begrenzten Druck erzeugen können und der Fortbewegungswiderstand im trockenen Boden zu hoch wird. Zudem muss den Regenwürmern genügend Nahrung (organisch gebundener Kohlenstoff) zur Verfügung stehen.