

# Boden unter Druck – Ursachen und Folgen der Bodenverdichtung und Zeitskalen für die Regeneration

Thomas Keller<sup>1,2</sup>

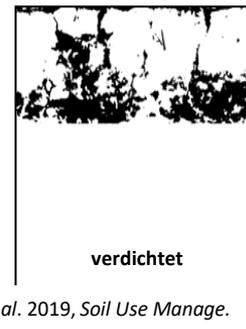
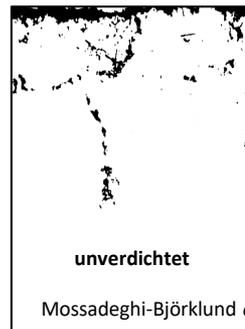
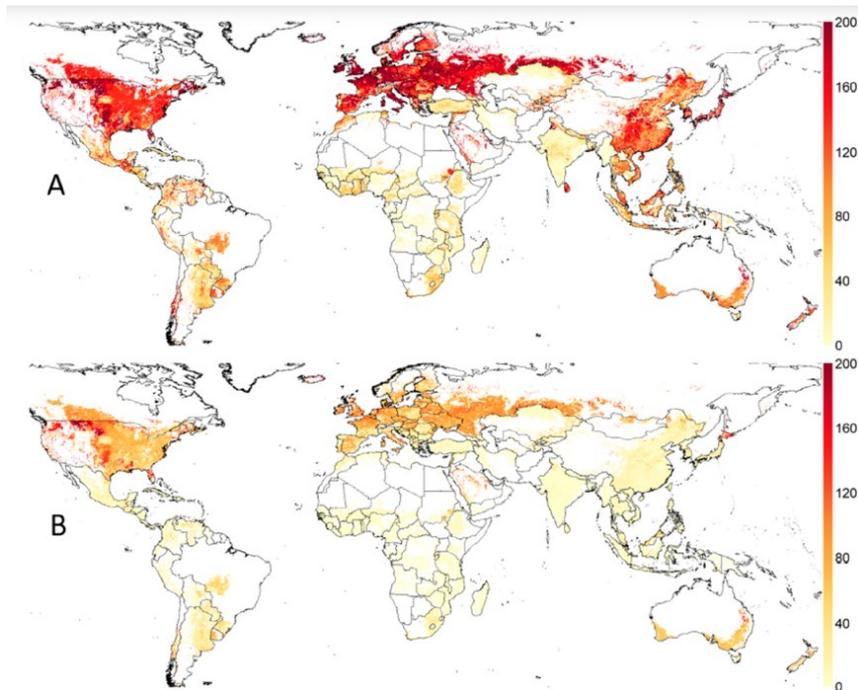
<sup>1</sup>Agroscope, Department of Agroecology & Environment, Zürich, Switzerland

<sup>2</sup>Swedish University of Agricultural Sciences, Department of Soil & Environment, Uppsala, Sweden

E-Mail: [thomas.keller@slu.se](mailto:thomas.keller@slu.se) / [thomas.keller@agroscope.admin.ch](mailto:thomas.keller@agroscope.admin.ch)

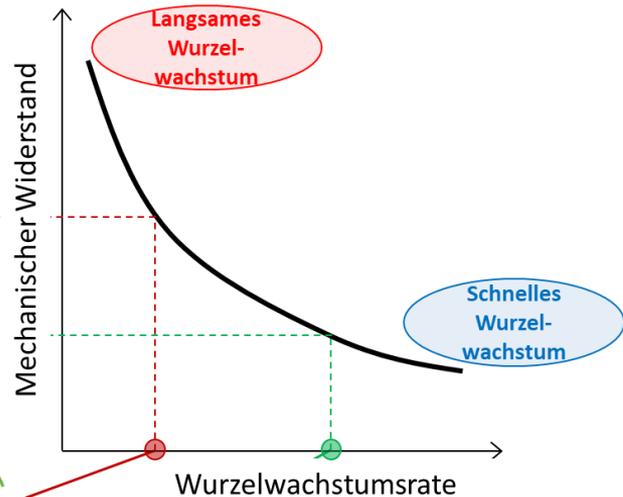
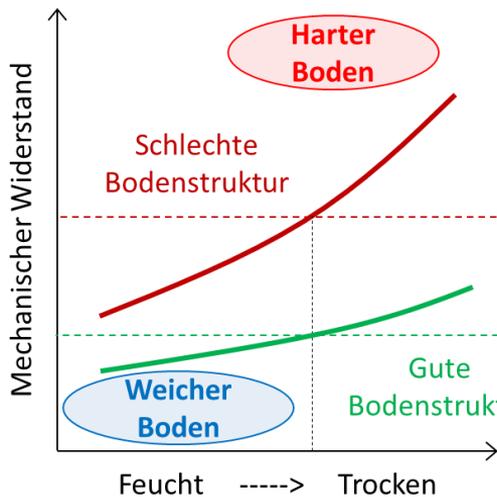
# Bodenverdichtung ist ein globales Problem und wirkt sich negativ auf Bodenfunktionen wie Pflanzenproduktivität und Wasserregulierung aus

Globale Muster von Ernteverlusten aufgrund A) Oberbodenverdichtung und B) Untergrundverdichtung

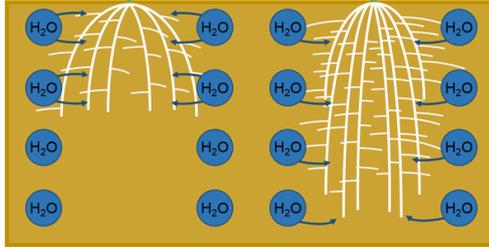


Mossadeghi-Björklund *et al.* 2019, *Soil Use Manage.*

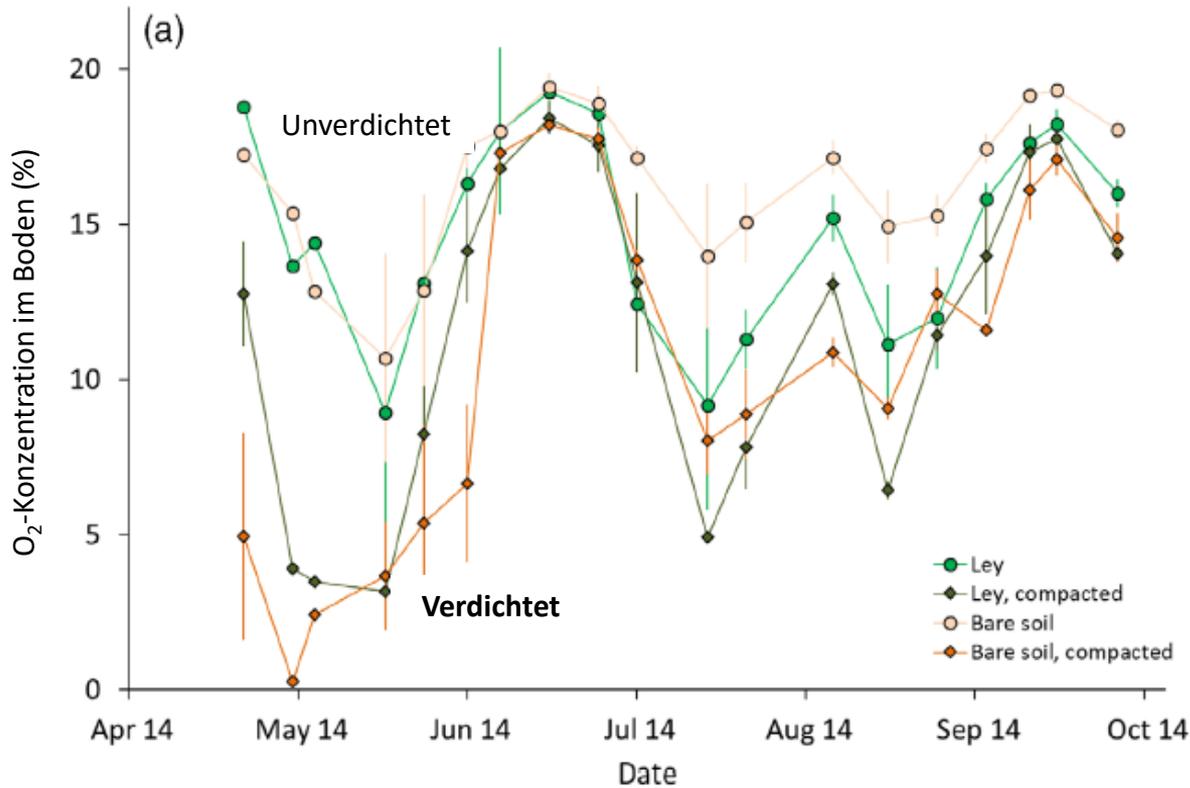
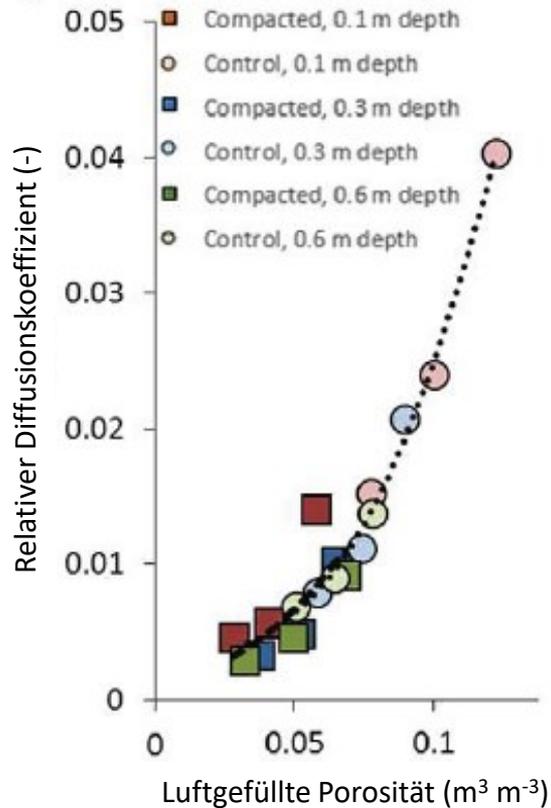
# Bodenverdichtung: mechanischer Widerstand begrenzt das Wurzelwachstum unter trockenen Bedingungen



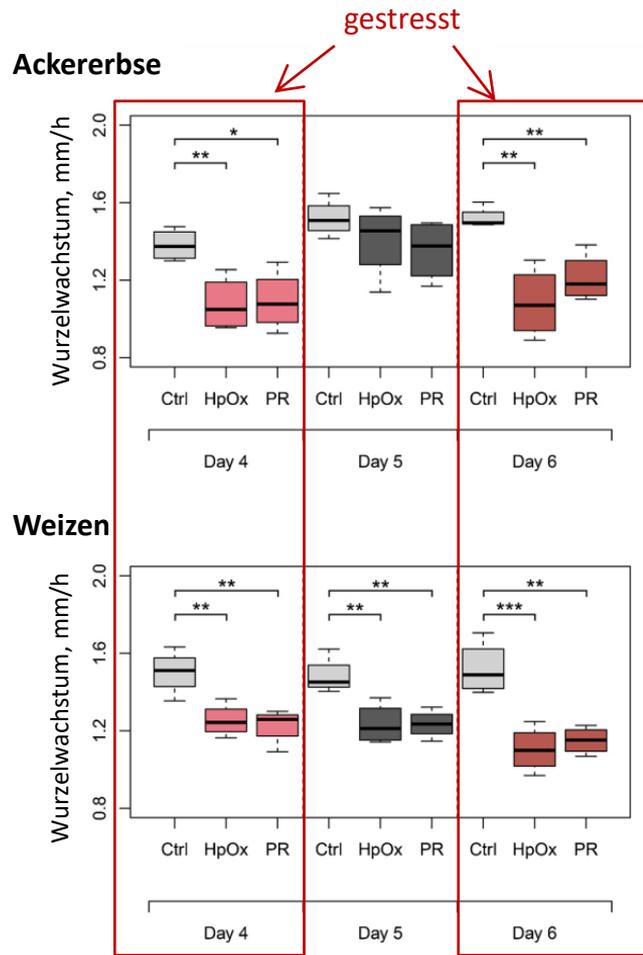
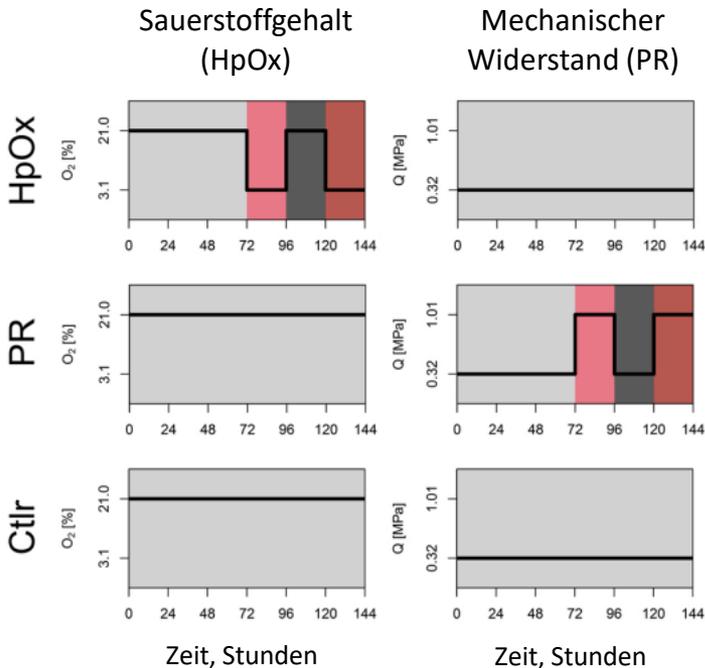
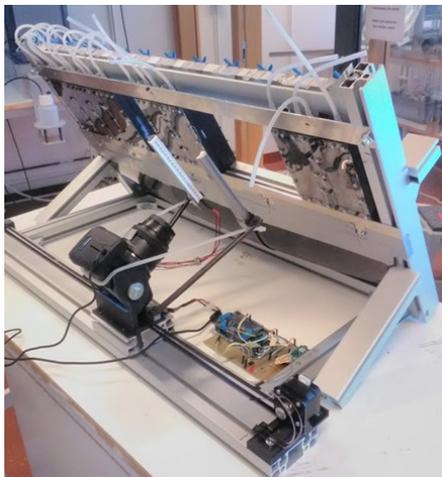
Colombi et al., 2018, *Sci. Tot. Environ.* 626.  
Colombi et al., 2020, *Arvensis* 06/2020, 8-10.



# Bodenverdichtung: verringerte Gastransportkapazität erhöht das Risiko für Sauerstoffmangel



# Das Wurzelwachstum wird bei hohem mechanischem Widerstand und/oder bei niedrigem Sauerstoffgehalt reduziert



# Kantonale Bodenbeobachtung der Zentralschweizer Kantone (Umwelt-Zentralschweiz nr 3, 2013)

news umwelt-zentralschweiz.ch

Nr. 3 | 2013

## Grobporig und luftdurchlässig?

### Verdichtung von landwirtschaftlichen Böden

Boden besteht rund zur Hälfte aus Hohlräumen – aber nur, wenn er gesund ist. Befährt man feuchten Boden mit zu schweren Maschinen, werden die grösseren Hohlräume (Grobporen) zusammengedrückt und der Boden verdichtet. Die Zentralschweizer Kantone haben zum ersten Mal genauer untersucht, wie sich intensive landwirtschaftliche Nutzung physikalisch auf den Boden auswirkt. Die Einschätzung der Experten: Mindestens ein Drittel der untersuchten Standorte ist beeinträchtigt.

### 248 Bodenproben untersucht

Um einen ersten Eindruck über die Situation in der Zentralschweiz zu gewinnen, untersuchte die Bodenüberwachung der Zentralschweizer Kantone im Jahr 2010 sechzehn Standorte: sechs Acker-, sieben Dauergrünland- und zwei Alpstandorte sowie eine Obstanlage.

An jedem Standort beprobte man eine typisch beanspruchte Fläche (z.B. Feldmitte) und eine stark beanspruchte Fläche (z.B. Anhaupf). Insgesamt 248 Bodenproben wurden im

news umwelt-zentralschweiz.ch

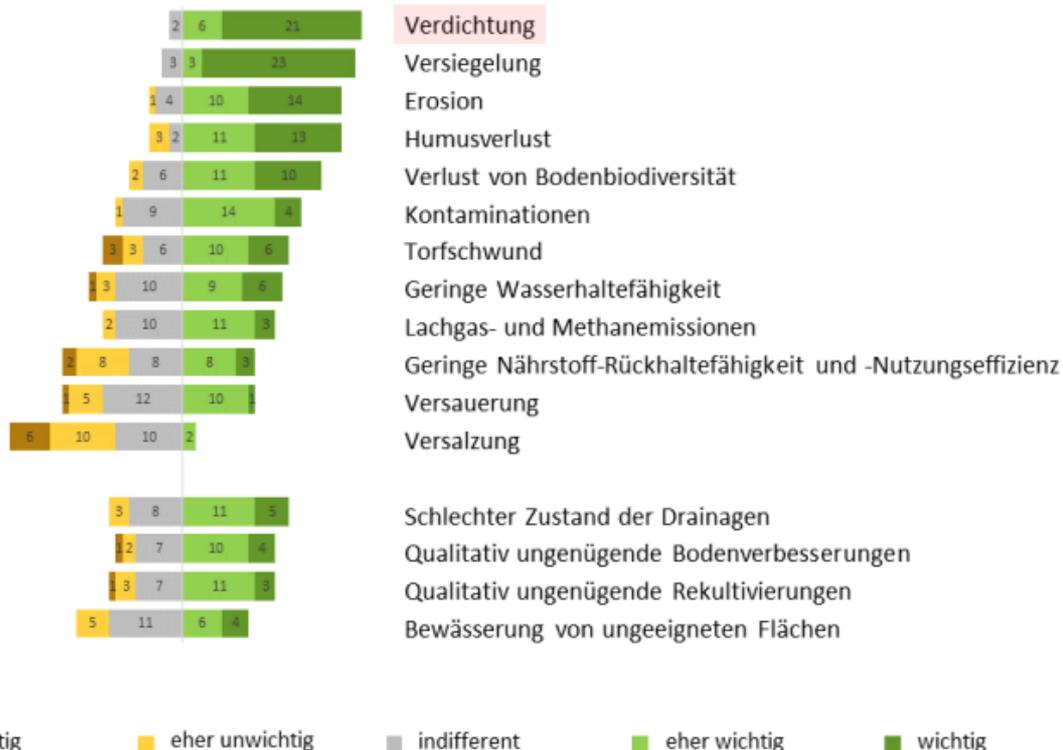
Anders ausgedrückt: Wahrscheinlich ist mindestens ein Drittel der Zentralschweizer Landwirtschaftsböden derart beeinträchtigt, dass die Folgen sicht- und spürbar werden: vermindertes Pflanzenwachstum, eine gehemmte Versickerung des Wassers, Erosion und eine Beeinträchtigung der Bodenlebewesen. Dies kann zu Ertragsverlusten führen.

Internationale Studien schätzen für Europa, dass 25-45% der landwirtschaftlichen Flächen verdichtet sind (Oldeman *et al.*, 1991; Graves *et al.*, 2015; Schjønning *et al.*, 2015; Brus & van den Akker, 2018).

# Meinungen von Stakeholdern zur Bedeutung von Soil Challenges in der Schweiz (Heller *et al.*, 2021, Agroscope Science 117)

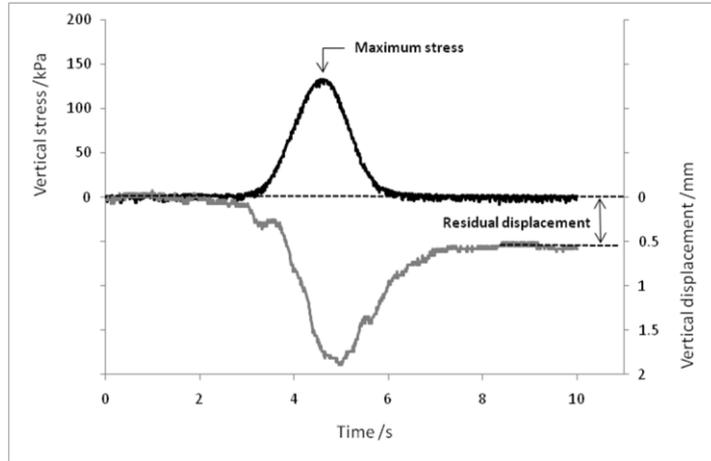
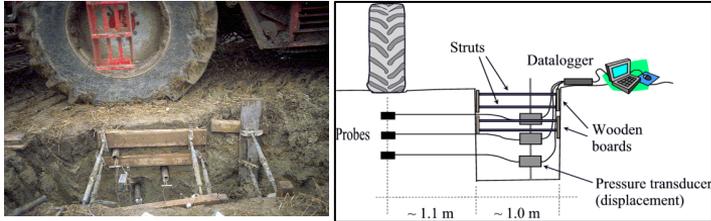
## Relevanz der 'Soil Challenges'

n = 29



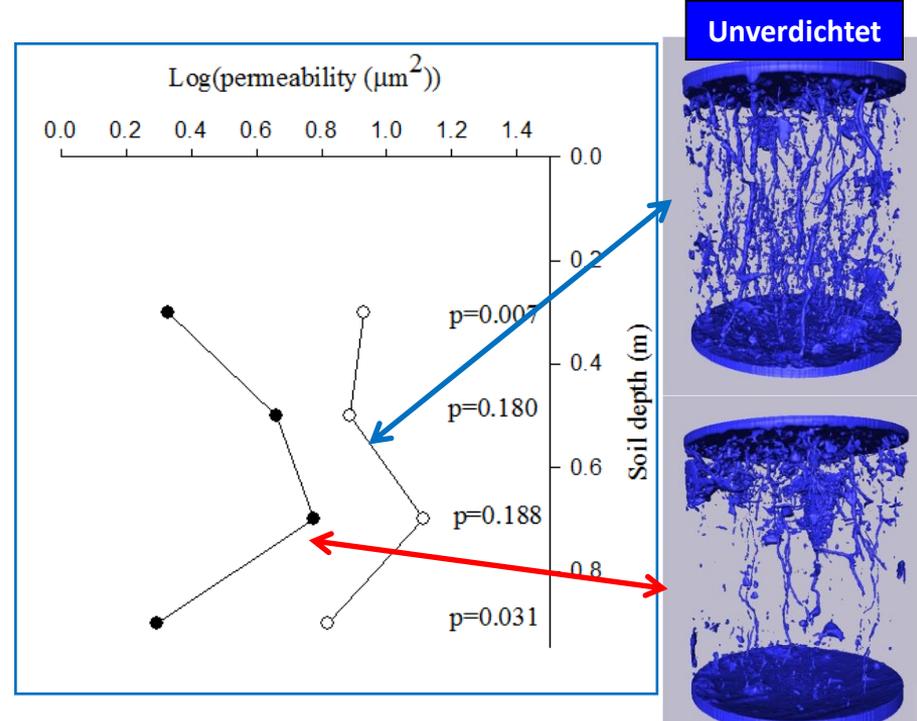
# Das Problem: die Zeitskalen für Verdichtung und Regeneration sind völlig unterschiedlich

## Verdichtung: Sekunden ( $10^0$ s)



Keller et al. 2012. *Soil Sci.* 177.

## Regeneration: Jahrzehnte ( $10^9$ s)



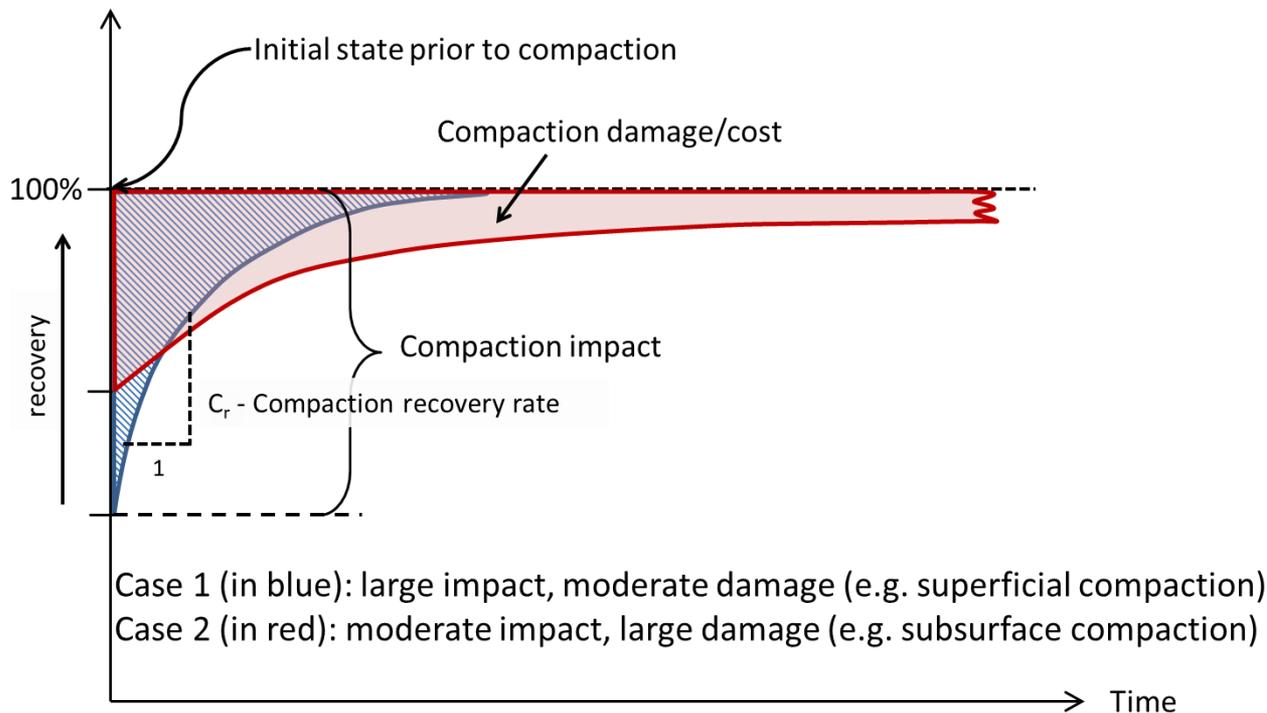
Unverdichtet

14 Jahre nach Verdichtung

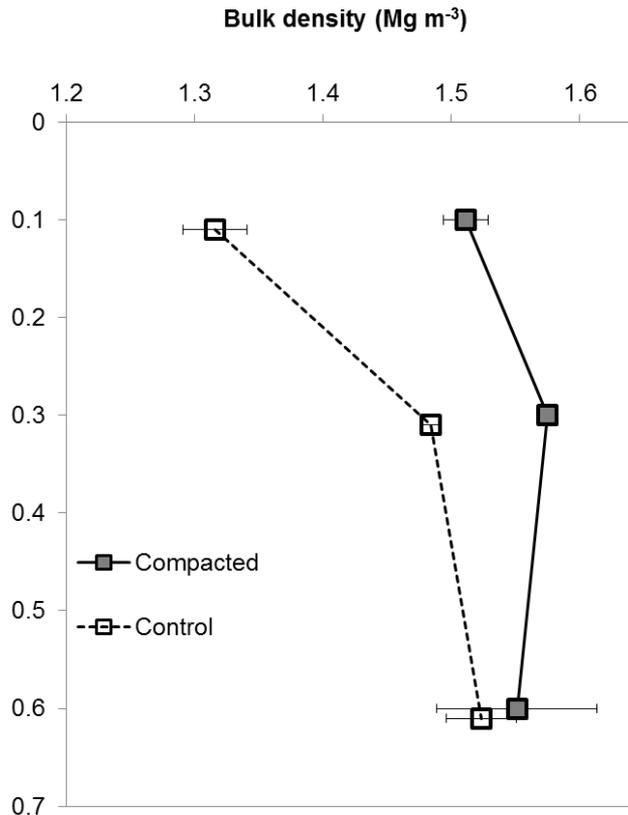
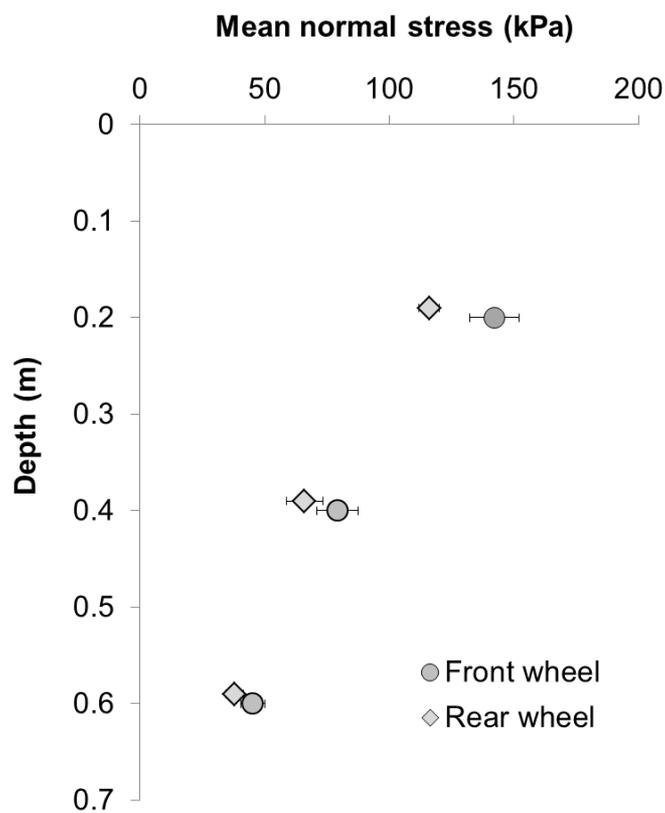
Berisso et al. 2012. *Soil Tillage Res.* 122  
 Lamandé et al., 2013. *Soil Sci.*, 178, 359-368.

# Kosten für Bodenverdichtung sind abhängig von der Regenerationszeit – aber wie schnell kann sich der Boden eigentlich erholen?

soil function or property  
(e.g. plant growth)



# Soil Structure Observatory (SSO) Zürich, – Initiale Verdichtung: Bodendruck und Veränderung Lagerungsdichte



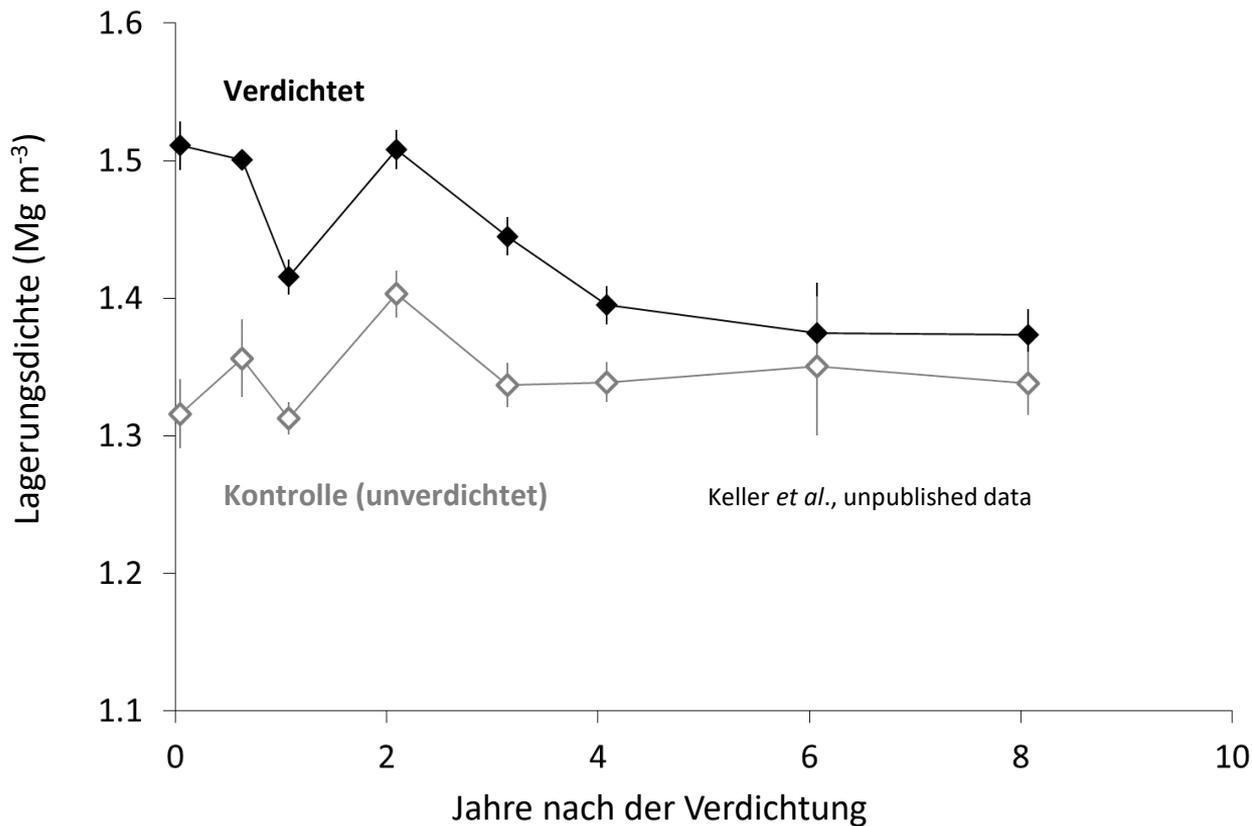
Verdichtung mit einem  
landwirtschaftlichen  
Fahrzeug, 8 Mg Radlast, am  
26. März 2014



# Die Bodenstruktur scheint sich noch nicht vollständig erholt zu haben

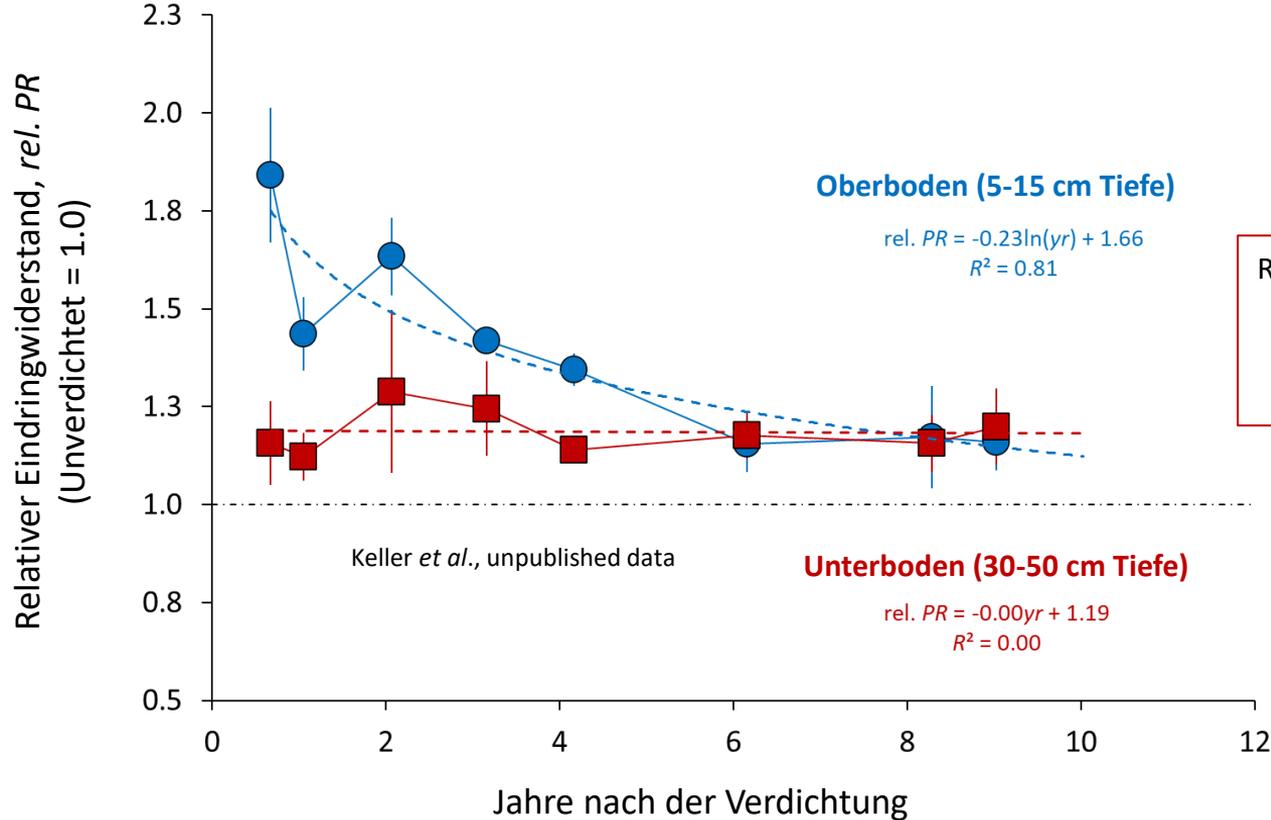


# Entwicklung Lagerungsdichte, 10 cm Bodentiefe, in Verfahren ohne mechanische Lockerung



# Mechanischer Widerstand für Wurzelwachstum

## Eindringwiderstand, Proxy für Wurzelwachstumsrate



Relativer Eindringwiderstand:

$$Rel PR = \frac{PR_{compacted}}{PR_{control}}$$

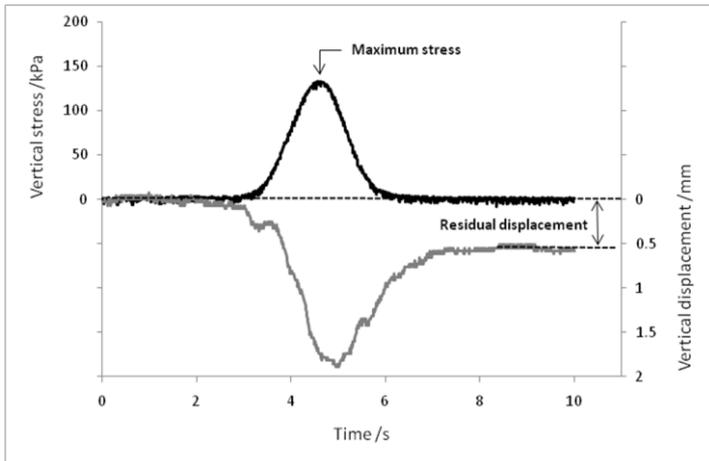


# “Dekompaktion” *versus* Bodenstrukturverbesserung

Bodenverdichtung bedeutet eine Nettoabwärtsbewegung von Bodenteilchen (Bodenmasse) und folglich erfordert eine "Ent-Verdichtung / Dekompaktion" des Bodens eine Netto-Aufwärtsbewegung der Bodenmasse.

Welche Prozesse führen zu einer Aufwärtsbewegung von Bodenteilchen?

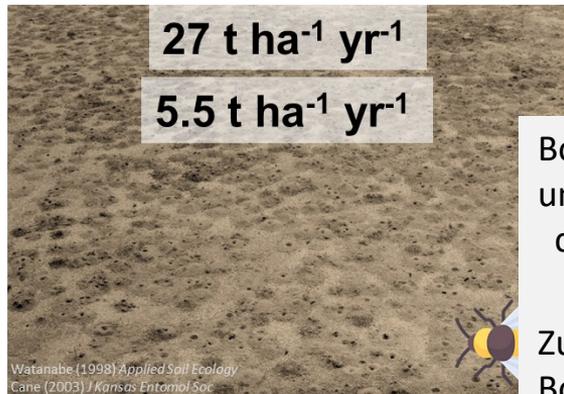
**Verdichtung: Boden wird nach unten verschoben**



**Dekompaktion: «wer»/was transportiert Boden nach oben?**



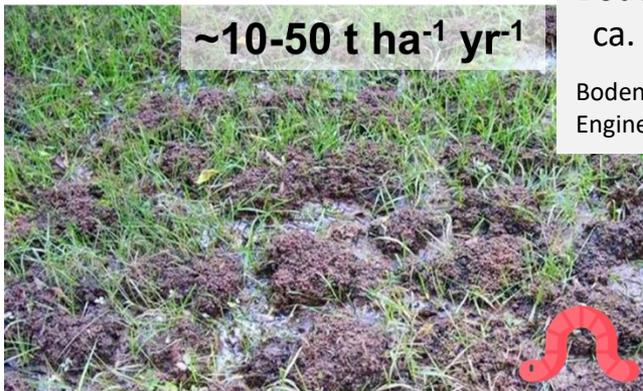
# Bodenökosystem-Ingenieure / "Dekompaktierer": Regenwürmer, Termiten, Ameisen, bodennistende Wildbienen – jährliche Aushubraten



Bodenprobennahme in unserem Feldexperiment?  
ca. 0.05 t ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup>

Zum Vergleich:  
Bodenbearbeitung  
ca. 3,000 t ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup>

Bodenbearbeitung ist die grösste Geo-Engineering-Aktivität auf der Erde

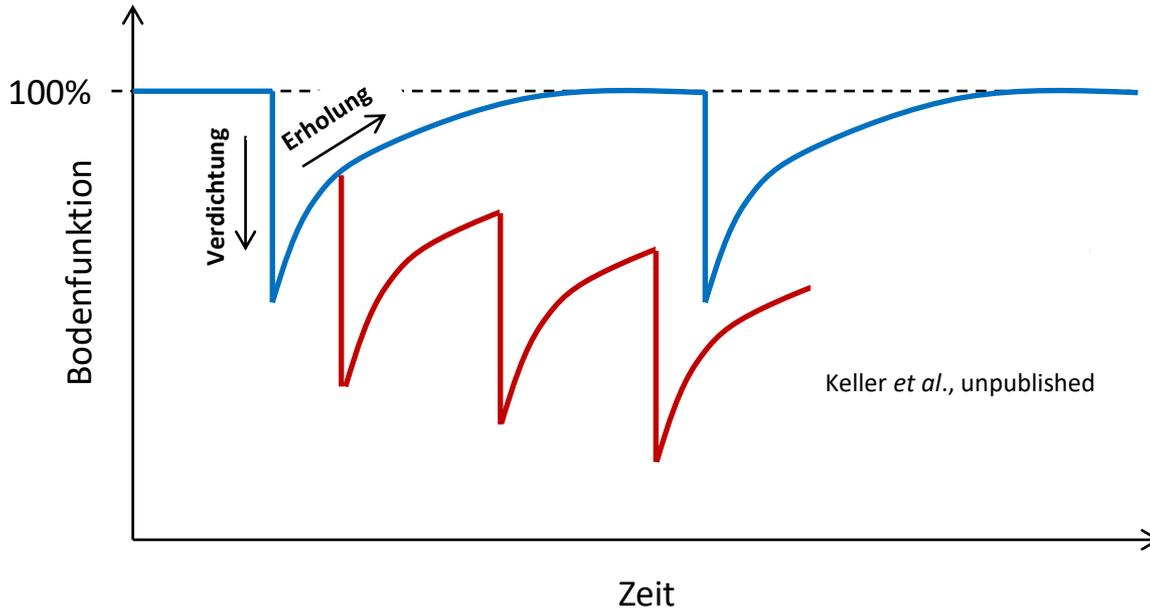


1 t = 1000 kg

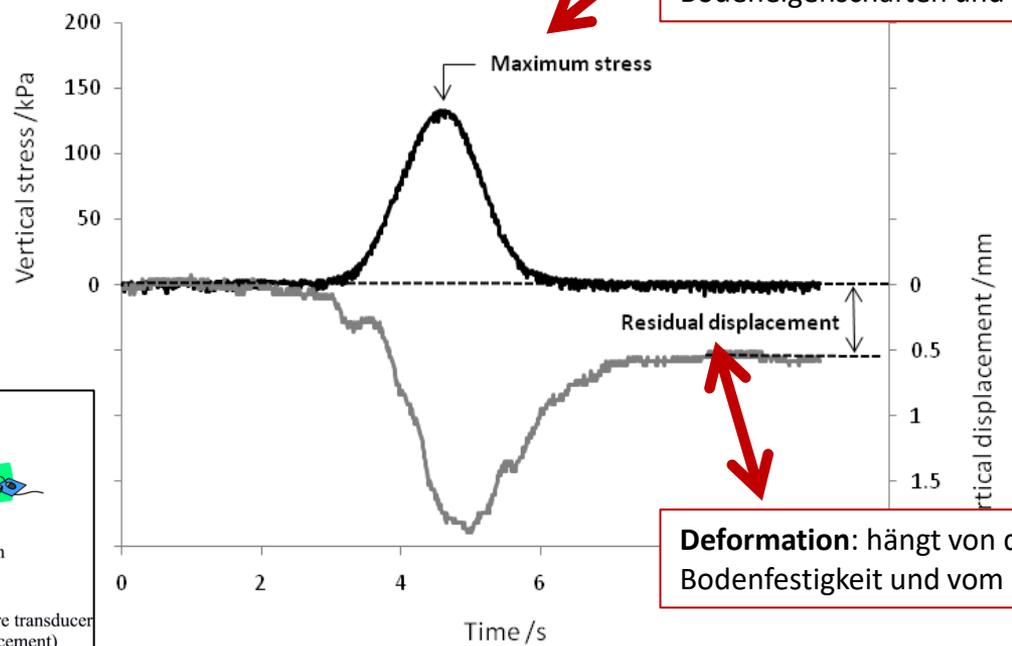
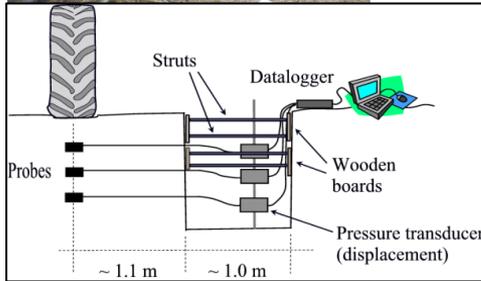
# Zeit zwischen den Verdichtungsereignissen ist kürzer als die Regeneration → Verhinderung von Bodenverdichtung ist die beste Strategie

Fall 1: der Boden erholt sich vor dem nächsten Verdichtungsereignis, eine Art "dynamisches Gleichgewicht", «nachhaltig»

Fall 2: die Häufigkeit der Verdichtungsereignisse ist zu hoch und/oder die Erholung zu langsam, was zu einer kontinuierlichen Verschlechterung der Bodenqualität führt



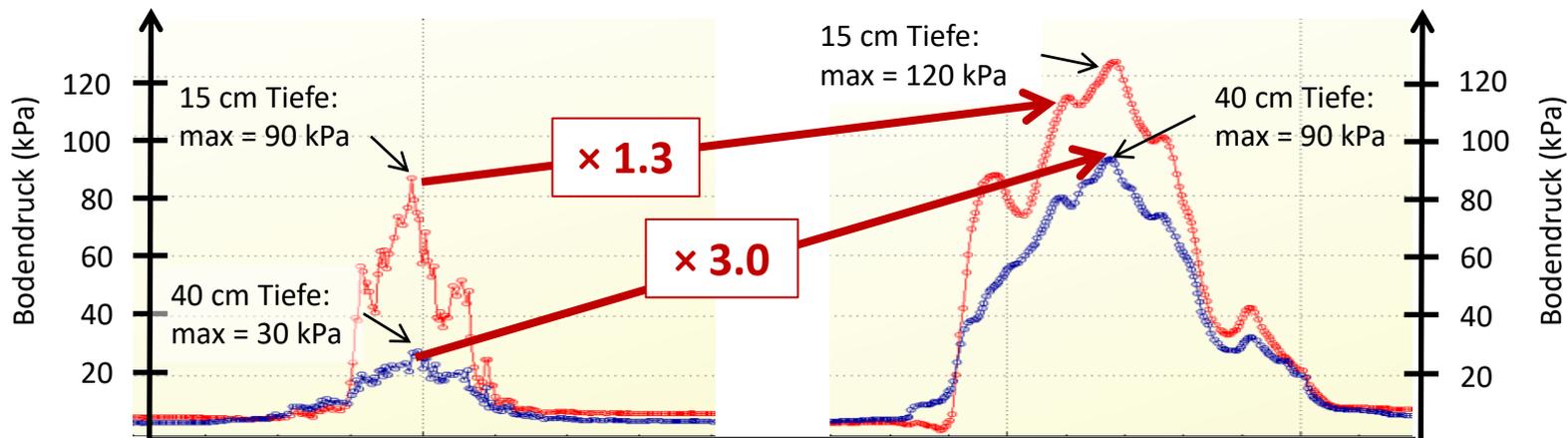
# Wie verhindern wir Bodenverdichtung? Eigentlich einfach: ob sich ein Boden verformt, hängt von der Bodenspannung («Druck») und der Bodenfestigkeit ab



**Druck:** in erster Linie abhängig von den Fahrzeugeigenschaften (Radlast, Reifen, Luftdruck, ...), aber auch von den Bodeneigenschaften und -bedingungen

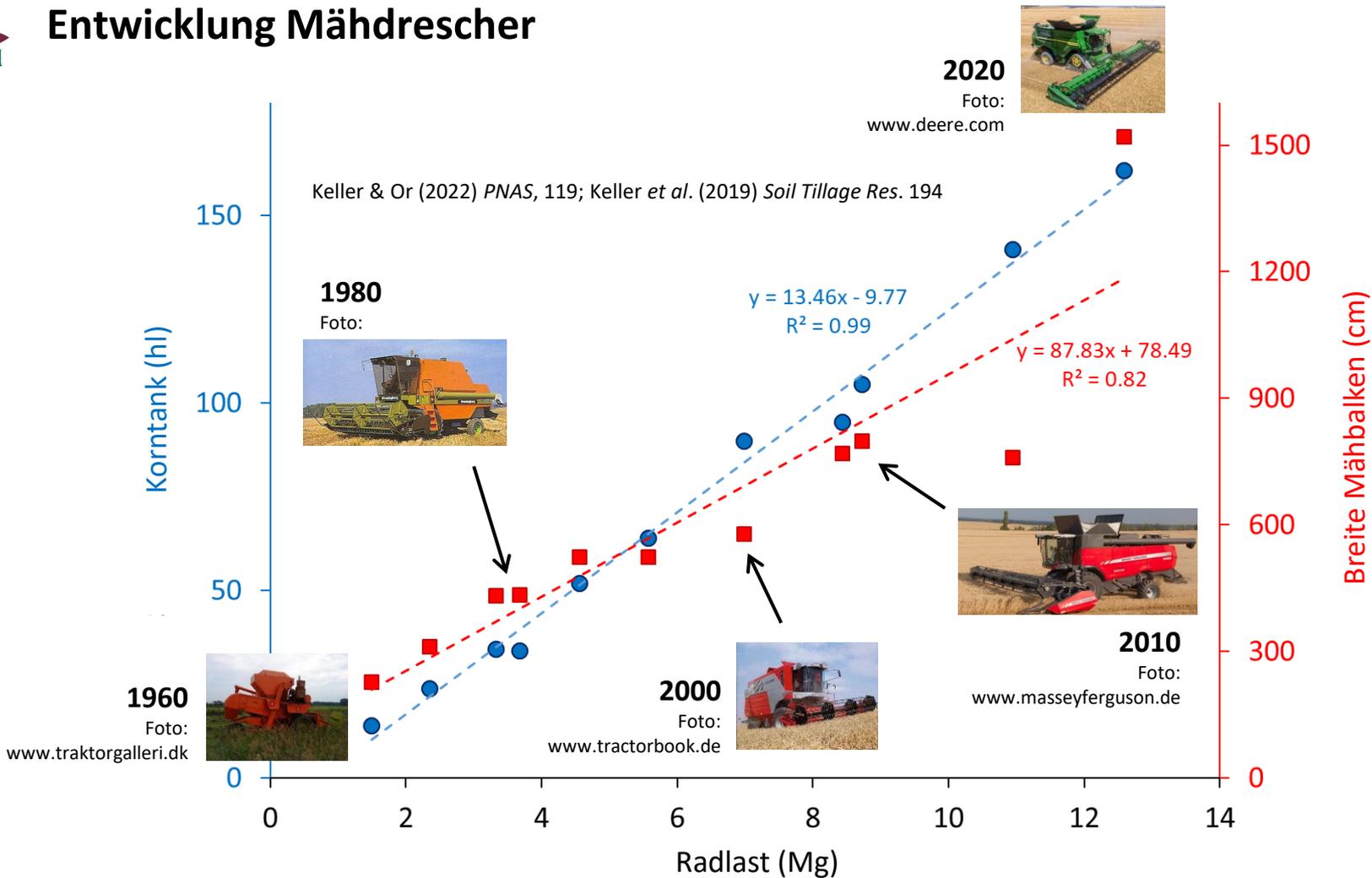
**Deformation:** hängt von der Bodenfestigkeit und vom Bodendruck ab

# Die Bodenverdichtung gibt zunehmend Anlass zur Sorge – mögliche Ursachen

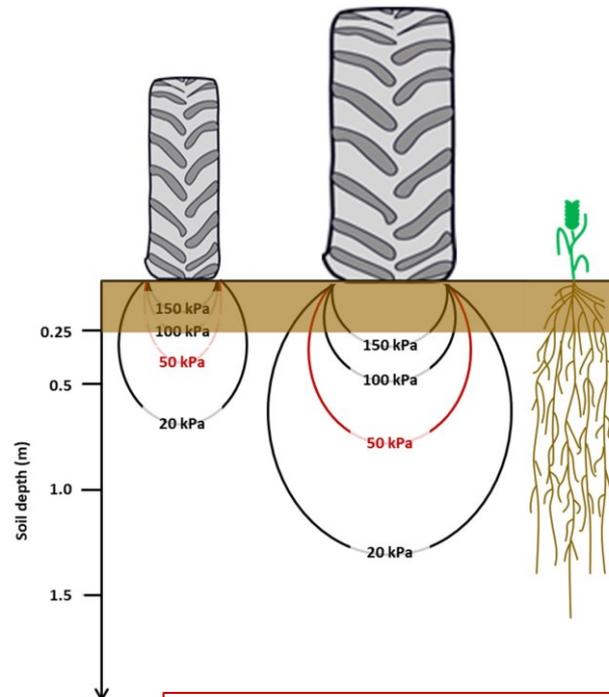
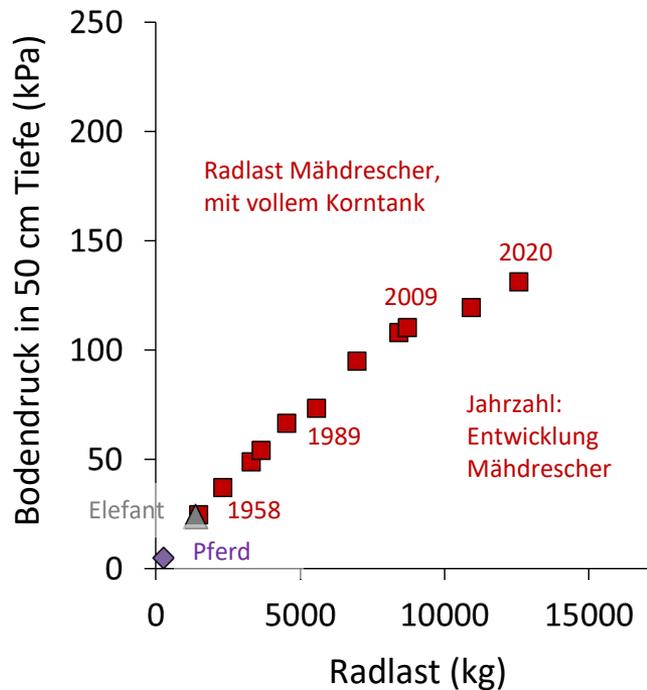


Keller, Stettler & Arvidsson, unpublished.

# Entwicklung Mähdrescher

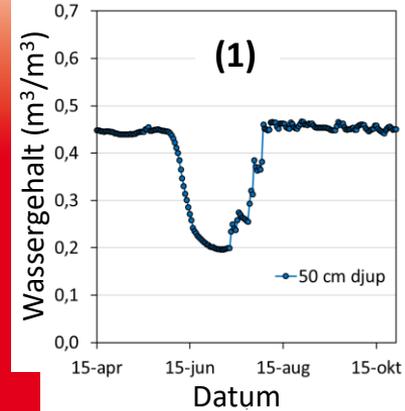


# Zusammenhang Radlast – Bodendruck im Unterboden

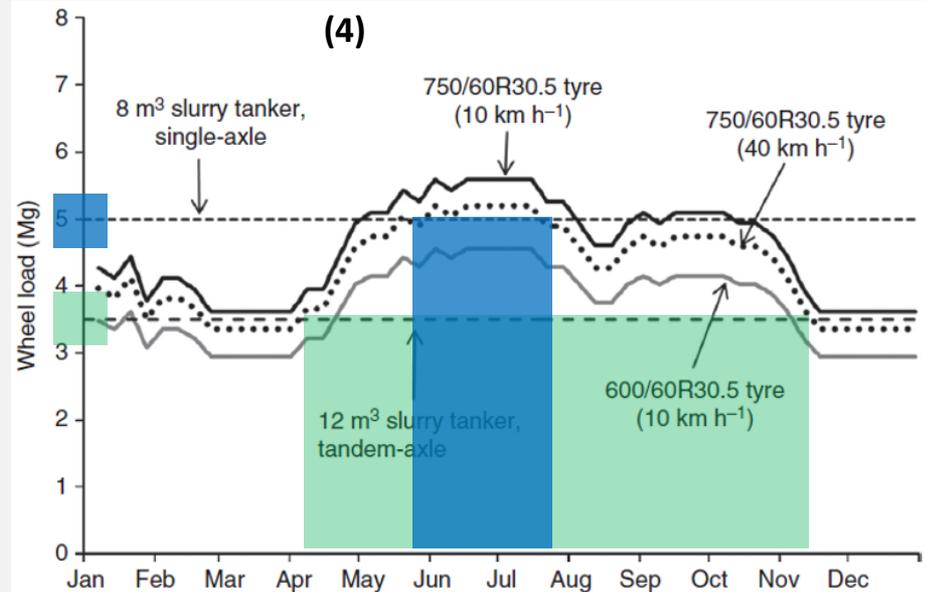
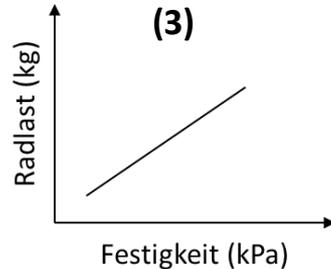
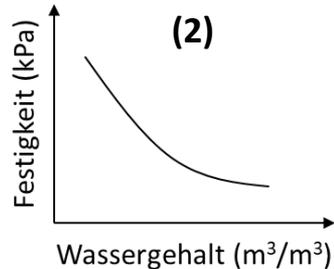


«50-50 Regel»: nicht mehr als 50 kPa in 50 cm Tiefe (Schjøning *et al.*, 2012, *Soil Use Mange*), basierend auf Feldmessungen von Keller *et al.* (2012, *Soil Sci* 177)

# Je grösser die Bodenbelastung, desto kleiner das «Fenster der Gelegenheit» (d.h., Bodenbedingungen die zu keiner Verdichtung führen)

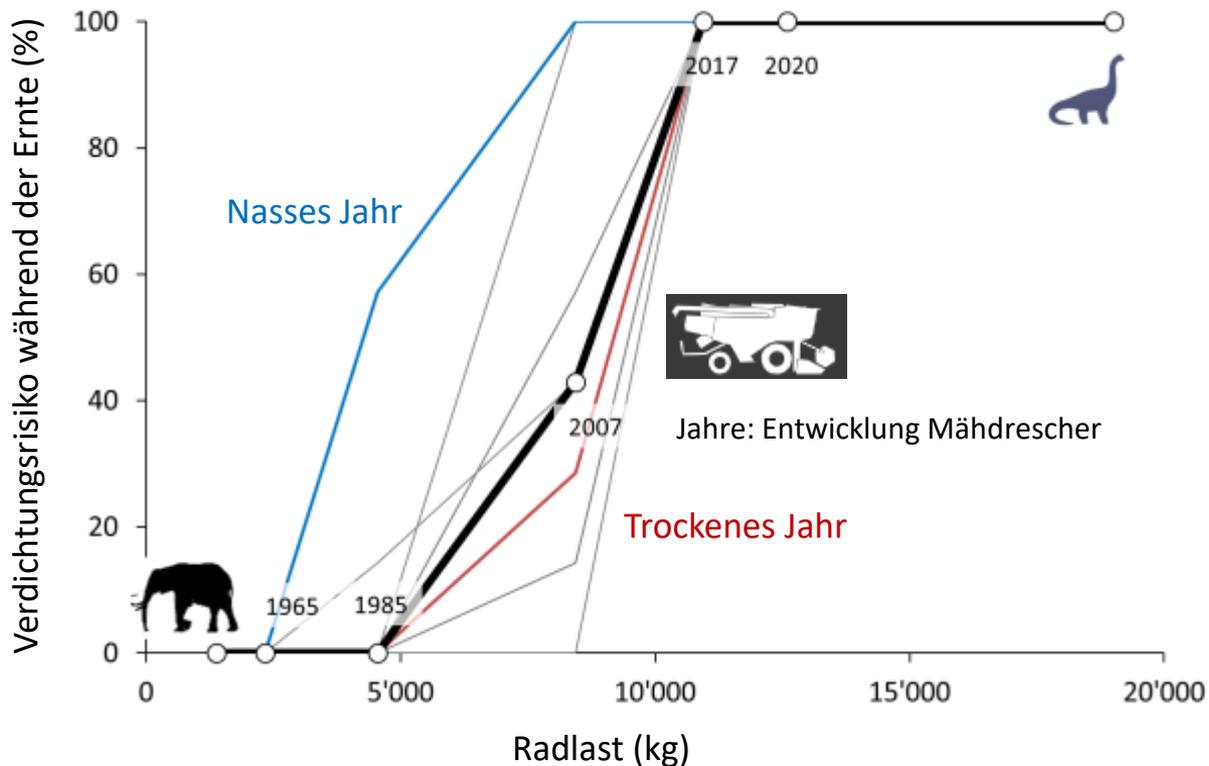


- 1) Bodenfeuchte im Jahresverlauf
- 2) Bodenfestigkeit =  $f$  (Bodenfeuchte)
- 3) Maximale Radlast =  $f$  (Bodenfestigkeit)
- 4) Maximale Radlast im Jahresverlauf



Gut *et al.* (2015) Soil Use and Management, 31.

# Je grösser die Bodenbelastung, desto kleiner das «Fenster der Gelegenheit» (d.h., Bodenbedingungen die zu keiner Verdichtung führen)



# Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

- Mit zunehmender Grösse und zunehmendem Gewicht der Maschinen wird der Druck auf den Boden immer grösser
- Verdichtung geschieht schnell ( $1 \text{ s} = 10^0$  Sekunden) – Regeneration ist sehr langsam ( $1 \text{ Generation} = 10^9 \text{ s}$ )
- Natürliche Regeneration ist selbst im Oberboden langsam
- Um Regenerationsraten aus Felddaten quantifizieren zu können braucht es lange Zeitreihen mit häufigen Messungen
- Es besteht ein Unterschied zwischen der «Dekompaktierung» (Gesamtporosität, mechanischer Widerstand) und der «funktionalen Regeneration der Porenstruktur» (z. B. Gastransporteigenschaften)
- Die Regeneration von Transporteigenschaften scheint schneller zu erfolgen als die «Dekompaktierung»; letztere erfordert einen Nettoaufwärtstransport von Bodenteilchen oder eine Volumenausdehnung



Photo: Bettina Marbot, Agridea (CH)

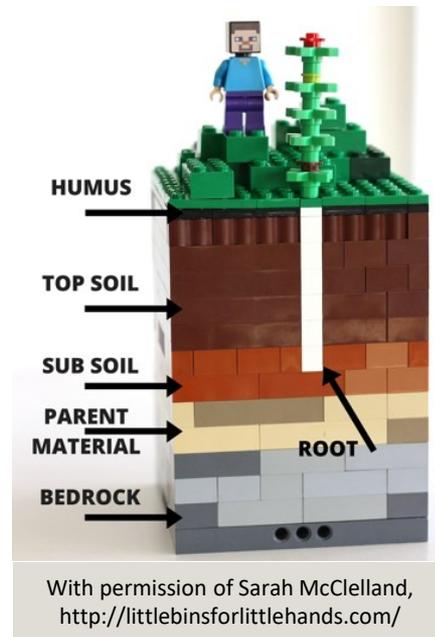


# Vielen Dank!

**Agroscope:** Many... Including Maria Vorkauf, Valerio Volpe, John Koestel, Marlies Sommer, Philippe Tschanz, Franzi Hafner, Stefan Schwarz, Dany Amstutz; *Retired:* René Reiser, Hansruedi Oberholzer, Viktor Stadelmann, Peter Weisskopf, Fritz Käser, Andreas Sauter.

**SLU:** Elsa Arrázola-Vásquez, Tino Colombi, Maria Sandin, Lorena Chagas Torres, Hanna Sjulgård, Mats Larsbo, Daniel Iseskog

**ETH Zürich:** Dani Or (now at University of Nevada), Siul Ruiz (University of Southampton), Stan Schymanski (Luxembourg Institute of Science and Technology), Dani Breitenstein (Phonak), Hans Wunderli (retired), Peter Lehmann, Achim Walter, Norbert Kirchgessner.



SCIENCE AND EDUCATION FOR SUSTAINABLE LIFE

Thomas Keller, [thomas.keller@slu.se](mailto:thomas.keller@slu.se) / [thomas.keller@agroscope.admin.ch](mailto:thomas.keller@agroscope.admin.ch)

FORMAS



Soil as a Resource  
National Research Programme NRP 68



EJP SOIL  
European Joint Programme



FNSNF  
SWISS NATIONAL SCIENCE FOUNDATION

