

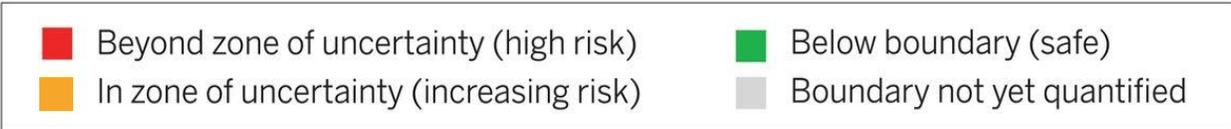
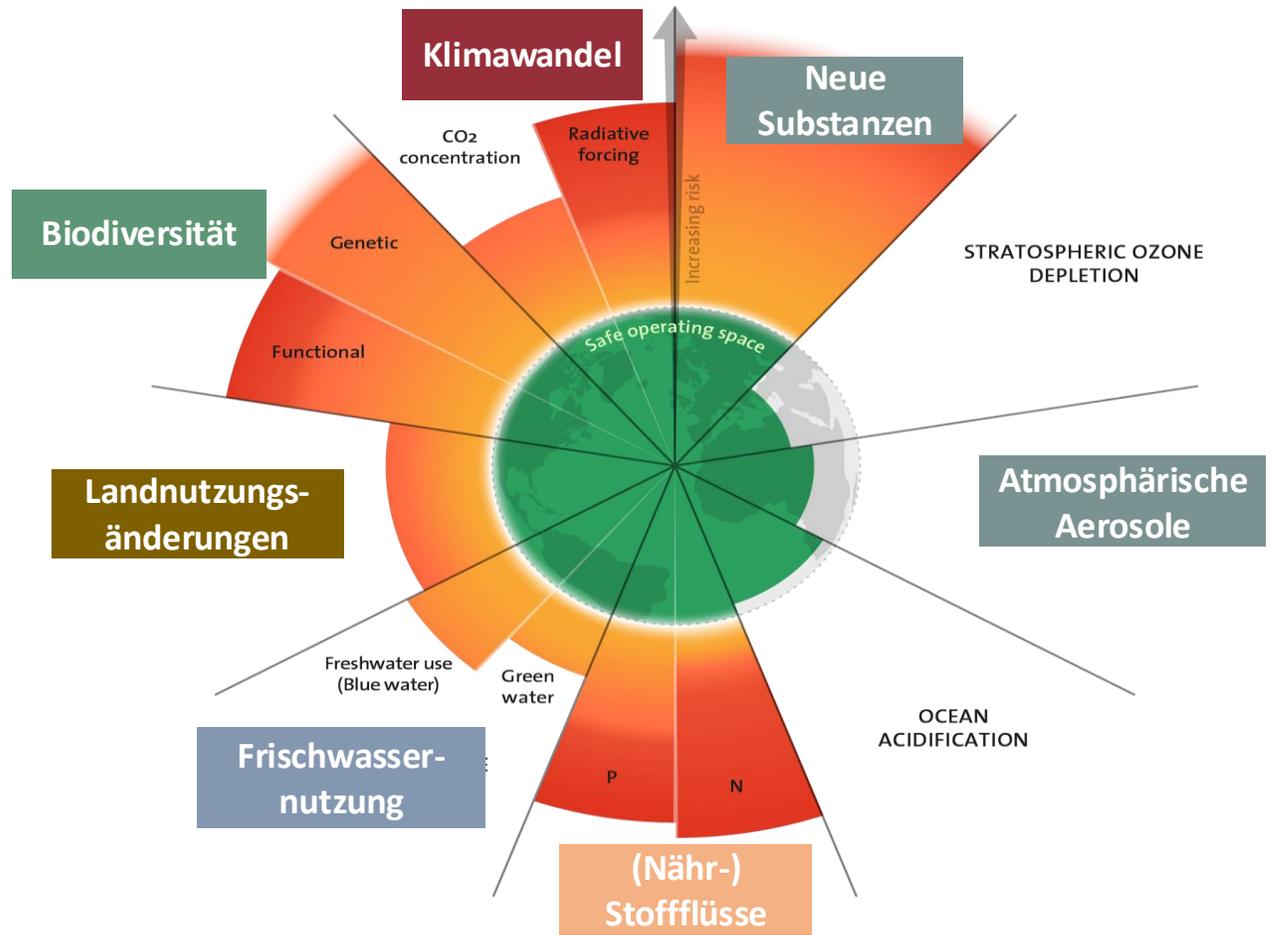


Die “Neue“ Humus-Theorie und Ableitungen für die Bodenbewirtschaftung

Humus Webinar für die Wasserbauern 12.05.2025

DI David Luger, Abteilung Pflanzenbau Bio Austria

Humus und Ökosystemfunktionen...



- • Quelle/Senke von THGs
- • Lebensraum für Tiere & Pflanzen
- • Artenvielfalt- und Vorkommen
- • Produktion von Energie, Futter- und Lebensmittel
- • Verbrauch von Grundwasser
- • Speicher- und Filter für Frischwasser
- • Speicherung und Nutzung von (Nähr-)stoffen
- • Pestizide
- • Mikroplastik
- • Verlust von Boden durch Erosion

... vieles liegt am Boden/Humus

Humus und Ökosystemfunktionen



Bodenerosion



Murenabgänge



Hagelschäden



Bodenverdichtung



Hochwasser



Extreme Trockenheit

Klimaszenarien für Böden in Österreich...

© SPARTACUS, ZAMG | Umweltbundesamt, 2021.
Zusammengefasst durch Luger, D.

Parameter	Referenzwert 1971-2000	RCP 8.5 - Kein Klimaschutz	RCP 2.6 Klimaschutz ambitioniert
T°C (Luft)	9,7 °C	+ 2,1 °C <small>(+1,6-2,9)</small>	+1,1 <small>(+0,9 - 1,4)</small>
Hitzetage	10	+ 11 <small>(+7-21)</small>	+5 <small>(+2 - 8)</small>
Extreme Dürren/10 Jahre	alle 10 Jahre	alle 4 <small>(2-7)</small> Jahre	alle 4 <small>(4-5)</small> Jahre
Extrem Niederschläge/Tag	32 mm	+ 29 % <small>(+9 - 46 %)</small>	+ 10 % <small>(+3 - 21 %)</small>
Spätfrosttage	- 1	-1 <small>(-2 - 1)</small>	-1 <small>(-2 - (+1))</small>



- Zunahme von Klima- Variabilität & Intensität von Extremwetter ist Hauptproblem für LW
- Trockenheit, T°C und Hitzeperioden nehmen trotz ambitioniertem Klimaschutz zu



Klimaszenarien für Böden in Österreich...

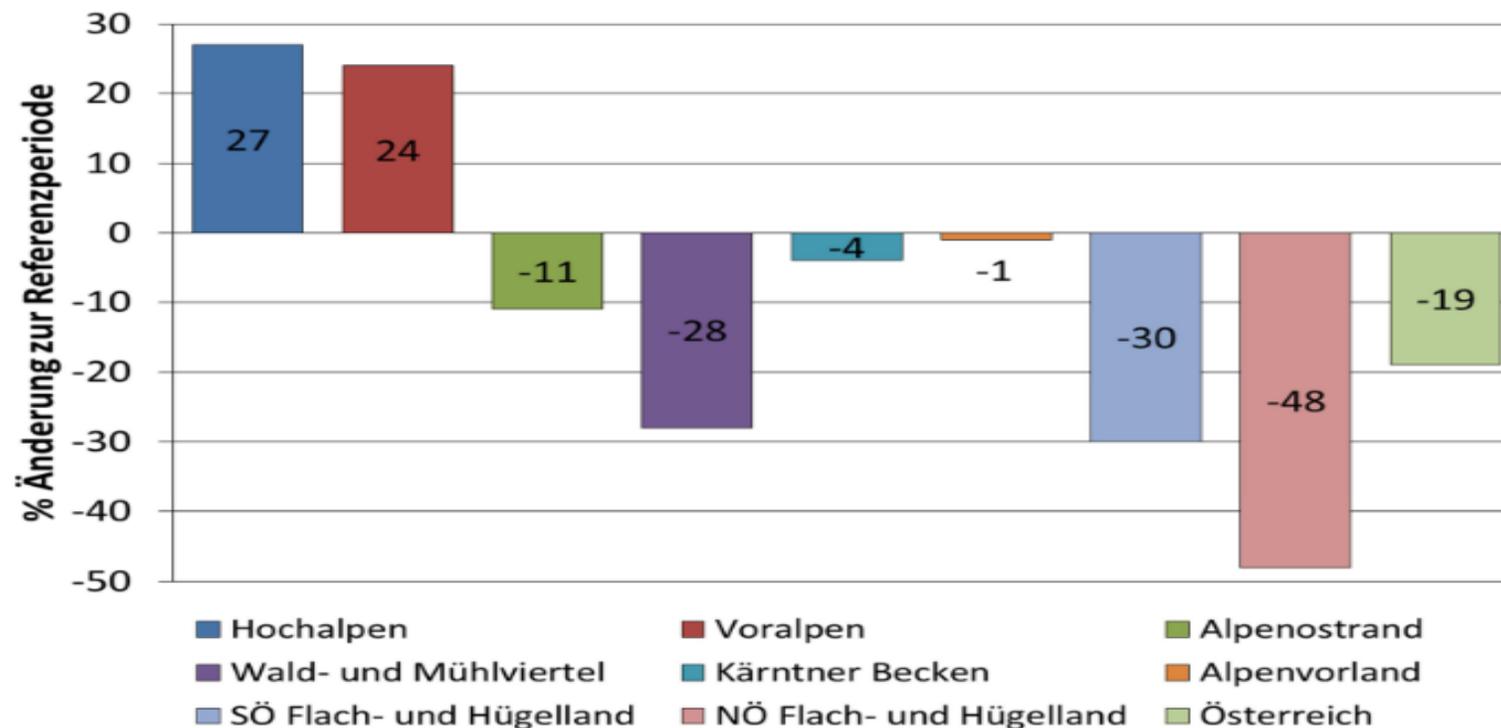
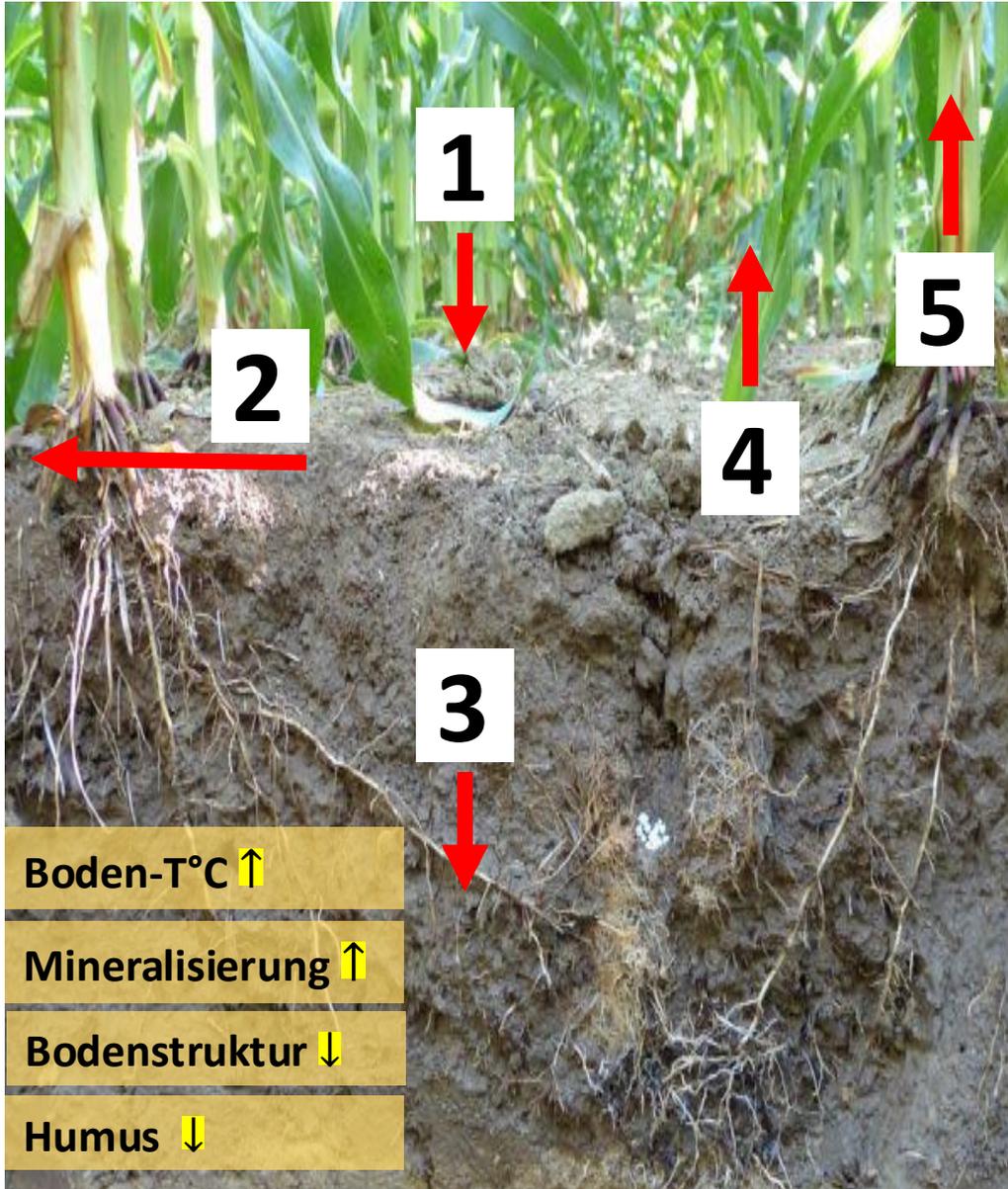


Abbildung 5: Änderung der Ertragsfähigkeit in den landwirtschaftlichen Hauptproduktionsgebieten im Vergleich Referenzperiode (1981-2010) und zukünftige Periode (2036-2065), Modell CMIP5

Haslmayr, et al. 2018; BEAT-Bericht



- Ertragsfähigkeit von Böden sinkt im Mittel um rund 19 % in ganz Österreich. Einzelne Regionen können nur mittelfristig profitieren



Konkrete Herausforderung der Böden und potentielle Humus-Ziele...

1 Niederschlag

Geringe Änderung der Summe, große bei der Verteilung, Nord-Süd Gradient wird stärker

2 Oberflächenabfluss

17-26 % Zunahme der 30-jährigen Extremniederschläge

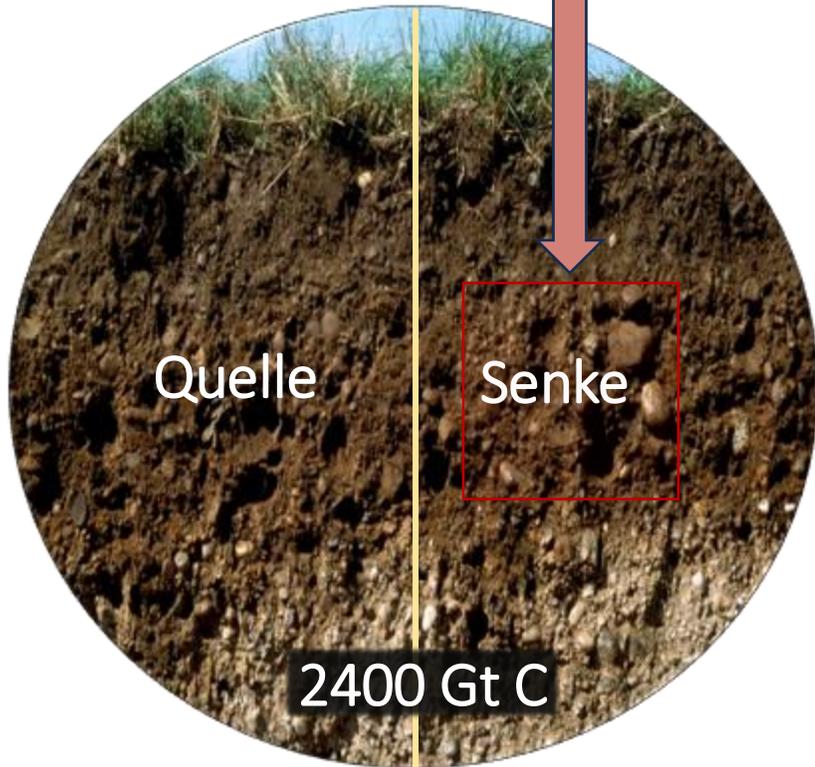
3 Tiefenversickerung

- 29 bis + 4% → Mehr Winterniederschlag erhöht ev. Grundwasserneubildung, höhere Verdunstung und mehr Abfluss aber gegenläufig

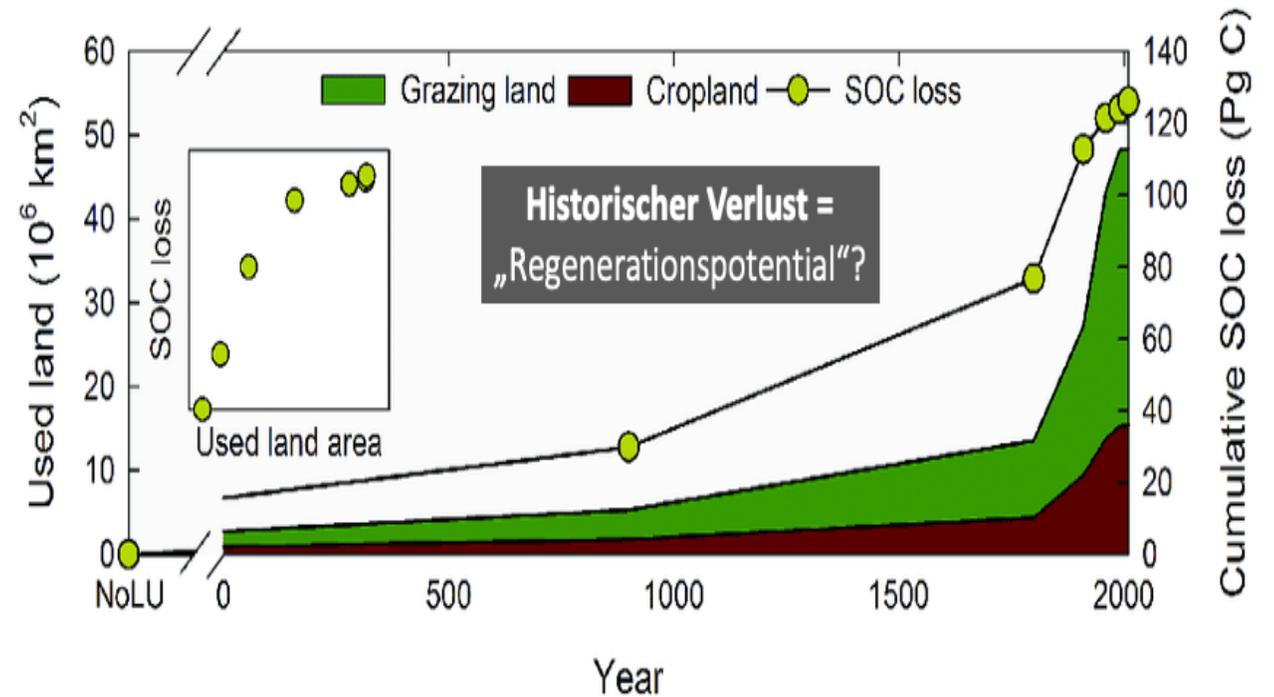
4+5 Evapotranspiration

Höhere T°C steigern Verdunstungsrate um 7-25 %

Humus als Senke für unvermeidbare Emissionen ?



Mit Ackerbau wurden Humusgehalte im Oberboden (30 cm) um ca. 40 – 60 % reduziert...



- Durch den Klimawandel wird dem Humusaufbau eine weitere bedeutende Rolle zugeschrieben

Humus für den Klimaschutz – Die Idee...

4per1000 – Initiative, Paris 2015

- Die Steigerung von C_{org} um 0,4 % / Jahr könnte jährlich die kompletten anthropogenen Emissionen kompensieren

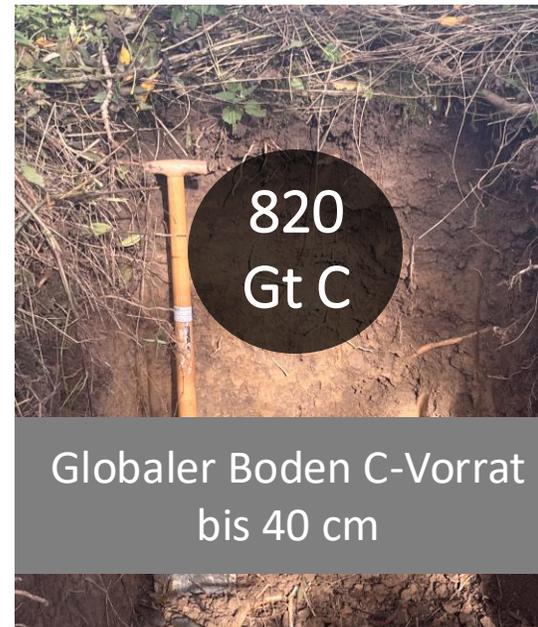
Die 4per-1000 Idee



Verändert nach Minasny et al., 2017

+ 3,5 Gt C y^{-1}

Anstieg CO_2 -äq / Jahr

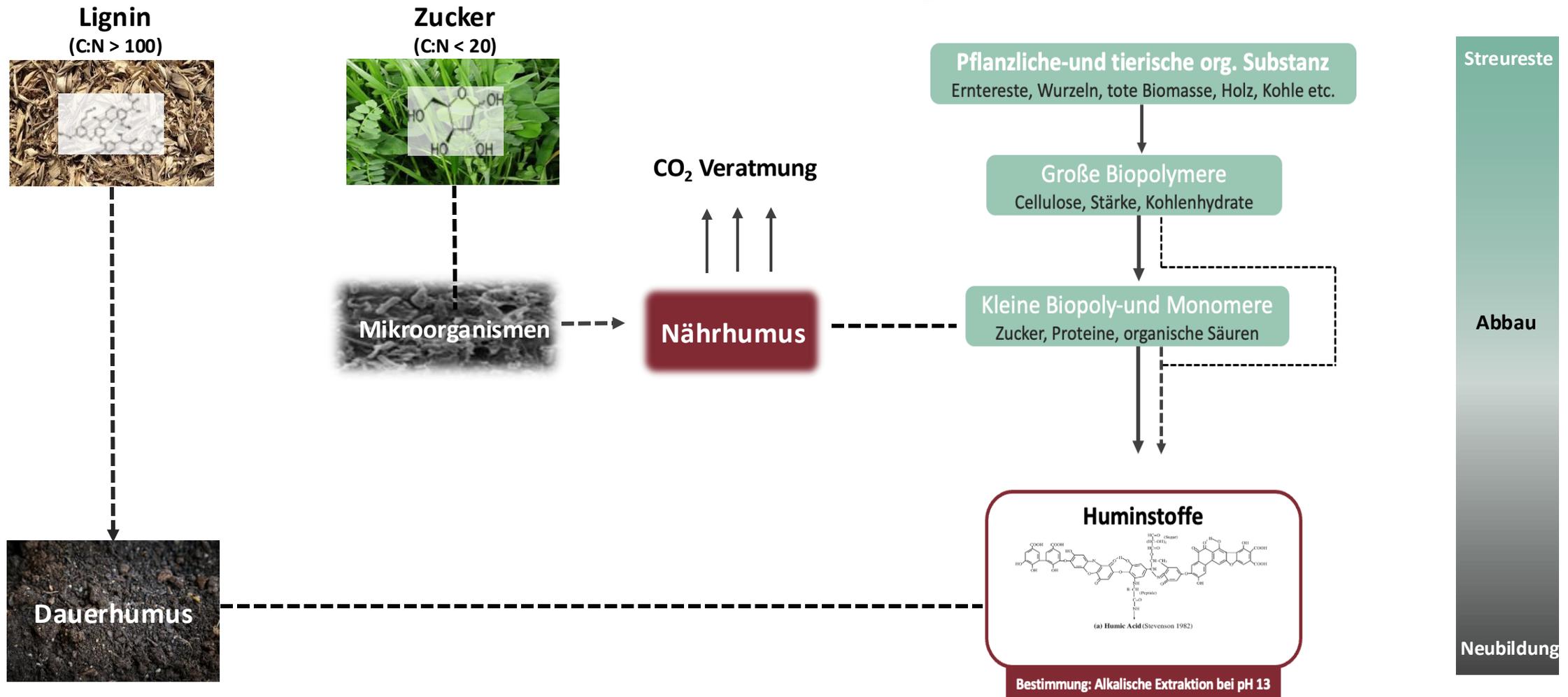


$$\frac{3.5}{820} = \underline{\underline{4 \text{ ‰}}}$$

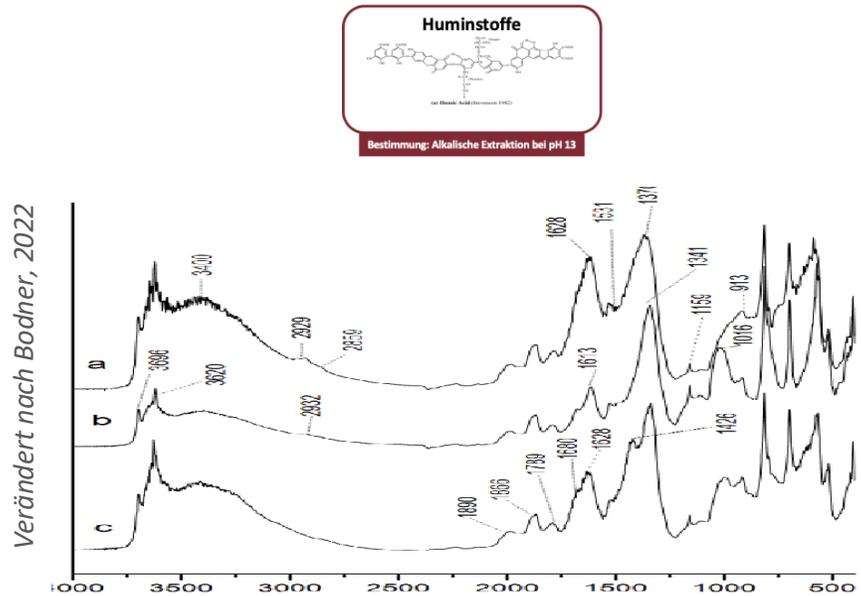


- Annahme 1: Chemische Komplexität bestimmt Humus Stabilität | Dauerhumus entsteht durch Bildung von Huminstoffen
- Annahme 2: Nährhumus wird schnell abgebaut und führt dabei zu CO₂ Veratmung durch Mikroorganismen

Die Humifizierung



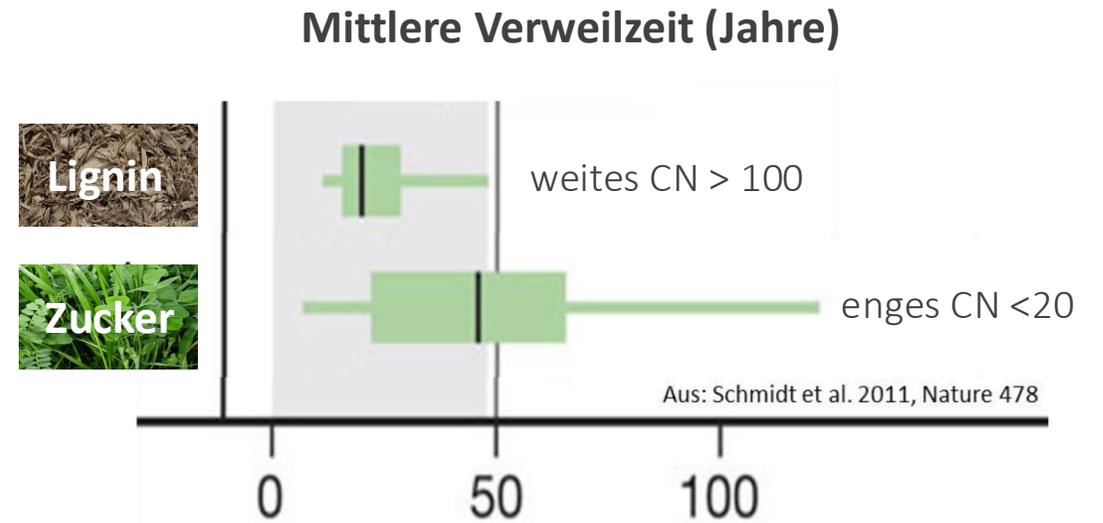
Problem 1 – Huminstoffe



Huminstoffe können im Boden nicht nachgewiesen werden

- Sie sind ein Produkt des Extraktionsverfahrens in einer stark basischen Lösung

Problem 2 – Chemische Stabilität



Chemisch komplexe Moleküle haben ähnliche oder kürzere Abbaugeschwindigkeit wie einfache Moleküle (z.B. Zucker)

- Chemische Komplexität entscheidet nicht über Stabilität von Humus !!!

Neue Humus-Theorie – Humus als Ökosystemeigenschaft

Humusstabilität = Vorwiegend eine Funktion aus dem physischen Schutz in Aggregatporen sowie der Interaktion mit Mineraloberflächen

➤ Aggregate und Mineraloberflächen sind wichtigste Humusspeicher --> Freiliegender Humus wird schnell abgebaut = Bodenstruktur

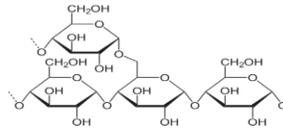
➤ Leichtlösliche kleine C-Moleküle tragen mehr zu Humus-Pools bei = Futterqualität für MO

➤ Mikrobielle Umsetzungseffizienz entscheidet über Anteil von C in Humus-Pool und C für CO₂-Veratmung = Bodenleben

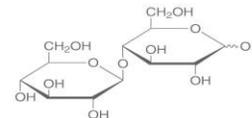
Beispiel Maisstroh



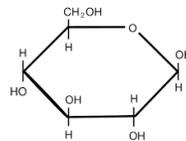
Polysaccharid
Zellulose



Dosaccharid
Cellobiose

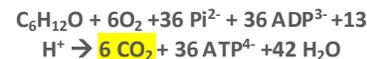


Monosaccharid
Glucose



Mikrobielle Assimilation

Mikrobielle Veratmung



Kontinuierliches Abbau-Modell

Pflanzliche- und tierische org. Substanz
Erntereste, Wurzeln, tote Biomasse, Holz, Kohle etc.

Physikalischer Abbau
(Regenwürmer, Streuzersetzer, ...)

Große Biopolymere
Cellulose, Stärke, Kohlenhydrate

Kleine Biopolymere
Proteine, Lipide, organische Säuren

Monomere
Aminosäuren, Glucose

Intrazelluläre Umsetzung
(Anabolismus vs. Katabolismus)

CO₂

Biochemische Umsetzung
(extrazelluläre mikrobielle Enzyme)

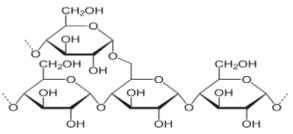
AGGREGATE

MINERALOBERFLÄCHEN

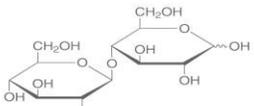
Beispiel Maisstroh



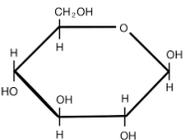
Polysaccharid
Zellulose



Dosaccharid
Cellobiose



Monosaccharid
Glucose



Mikrobielle Assimilation

Mikrobielle Veratmung



Verändert nach Lehmann, 2015 und Bodner, 2022

Kontinuierliches Abbau-Modell

Pflanzliche-und tierische org. Substanz
Erntereste, Wurzeln, tote Biomasse, Holz, Kohle etc.

Physikalischer Abbau
(Regenwürmer, Streuzersetzer, ...)

Große Biopolymere
Cellulose, Stärke, Kohlenhydrate

Kleine Biopolymere
Proteine, Lipide, organische Säuren

Monomere
Aminosäuren, Glucose

Intrazelluläre Umsetzung
(Anabolismus vs. Katabolismus)



Biochemische Umsetzung
(extrazelluläre mikrobielle Enzyme)

Humus Poole

AGGREGATE

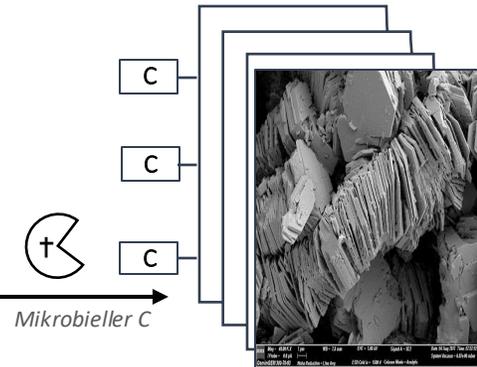
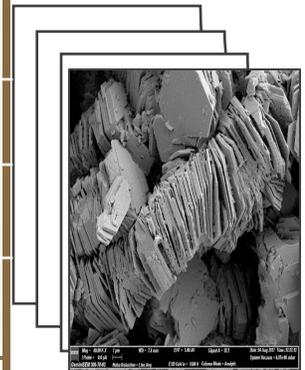
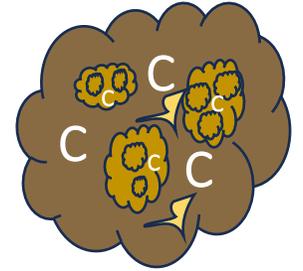
Freiliegend, ungeschützt
Verweilzeit < 10 Jahre

Schutz vor Abbau
Verweilzeit: < 500 Jahre

MINERALOBERFLÄCHEN

Direkte Fixierung
Verweilzeit: > 500 Jahre

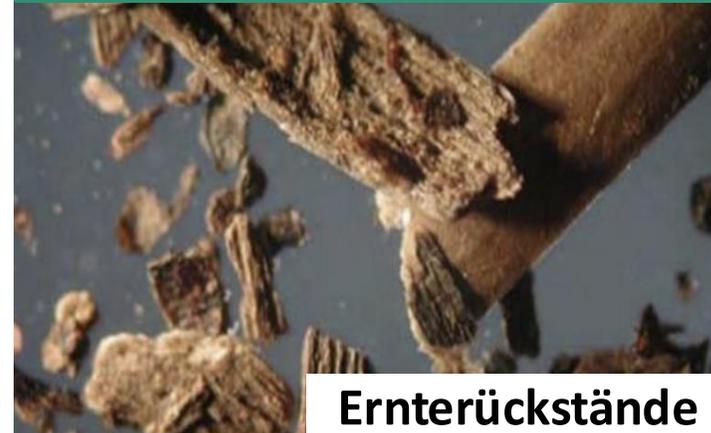
Fixierung über
mikrobielle Biomasse
Verweilzeit: > 500 Jahre



Mikrobieller C

Humus-Quelle

Partikulärer C



Ernterückstände



Wurzelstücke

Humus-Speicher

Aggregat-Humus (POM)

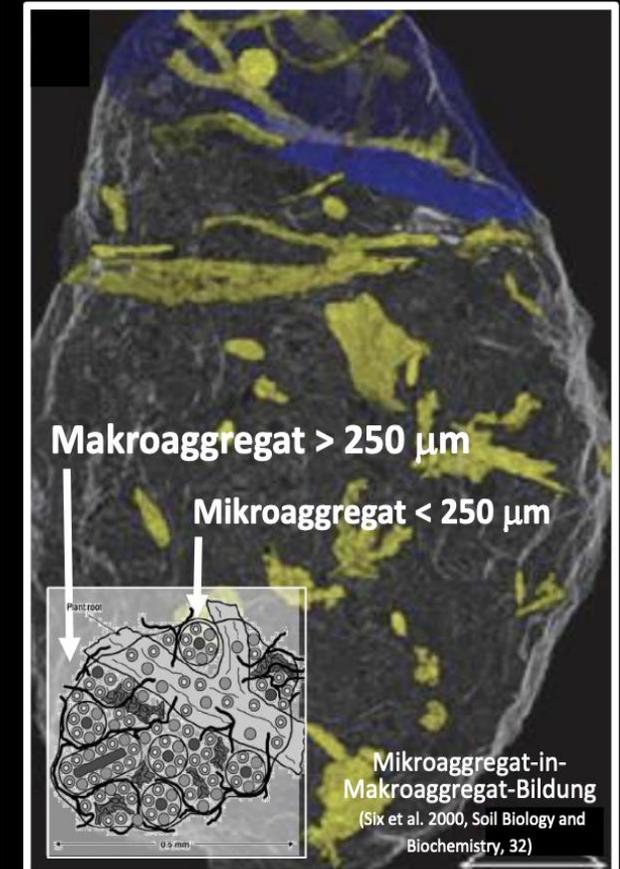


Bild: Kravchenko et al., 2014

➤ Teilzersetzte organische Substanz wird in Aggregaten isoliert und trägt so zum Humus bei

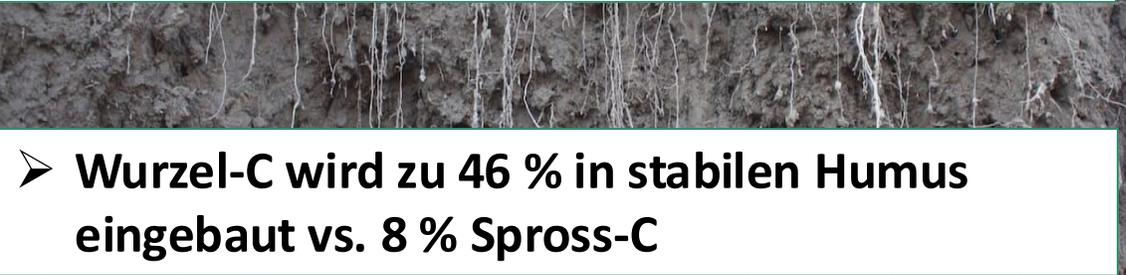
➤ POM-Humus > 53 µm

- Hohes CN
- Chemisch komplex
- Im Boden eher kurzlebig (1-50 Jahre)

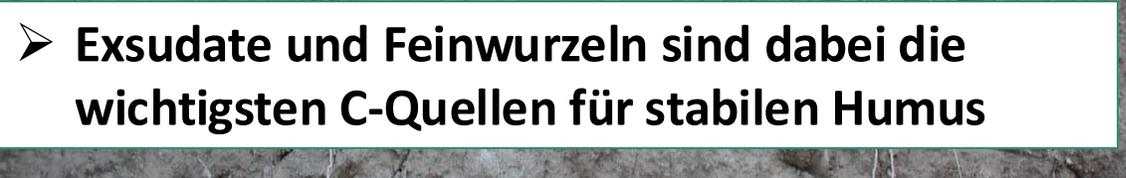
➤ Je kleiner die Aggregate, desto besser der Schutz von Humus



- Auf Ackerflächen geht nur 10 % des C der Nettoprimärproduktion in Wurzel
- In Grünland bis 60 % !!!



- **Wurzel-C wird zu 46 % in stabilen Humus eingebaut vs. 8 % Spross-C**

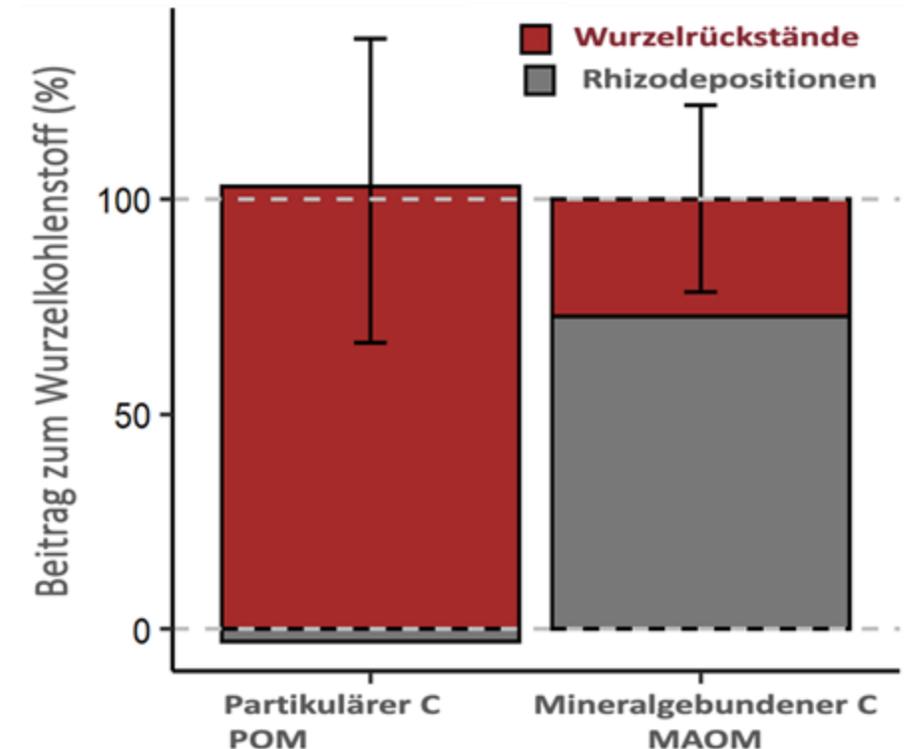


- **Exsudate und Feinwurzeln sind dabei die wichtigsten C-Quellen für stabilen Humus**

Ein Plädoyer für vielfältige Begrünungen und insb. Luzerne, Wicken, Roggen, Hafer, Klee...



Humus braucht Wurzeln!!!



➤ Leichtlösliche und mobile org. Substanzen werden an Mineraloberflächen fixiert

➤ MAOM-Humus < 53 µm

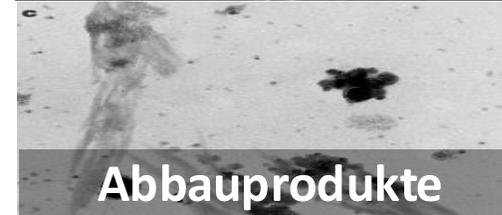
- niedriges C:N
- Leichtlöslich
- Im Boden sehr langlebig (10-1000 Jahre)
- Sättigungsgrenze gemäß Bodenart

➤ Beitrag zu MAOM-Humus am höchsten in Rhizosphäre und über mikrobielle Biomasse

Humus-Quelle



Gelöste organische Substanzen (DOM)



Humus-Speicher



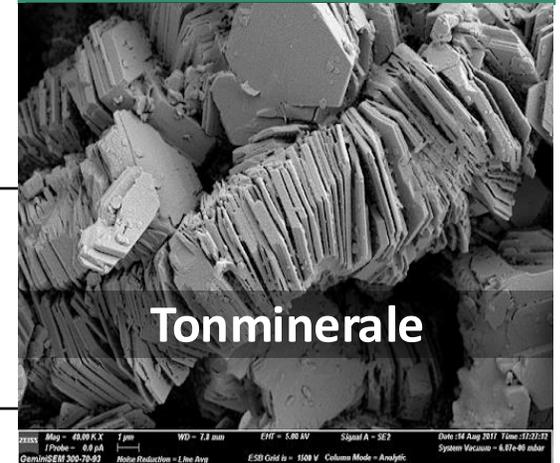
Mineral-Oberflächen = MAOM-Humus

+

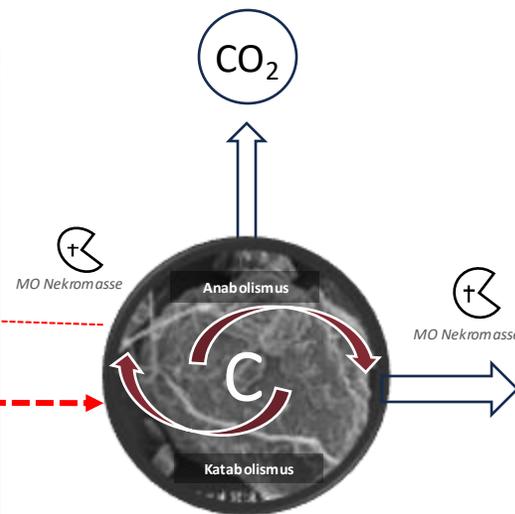
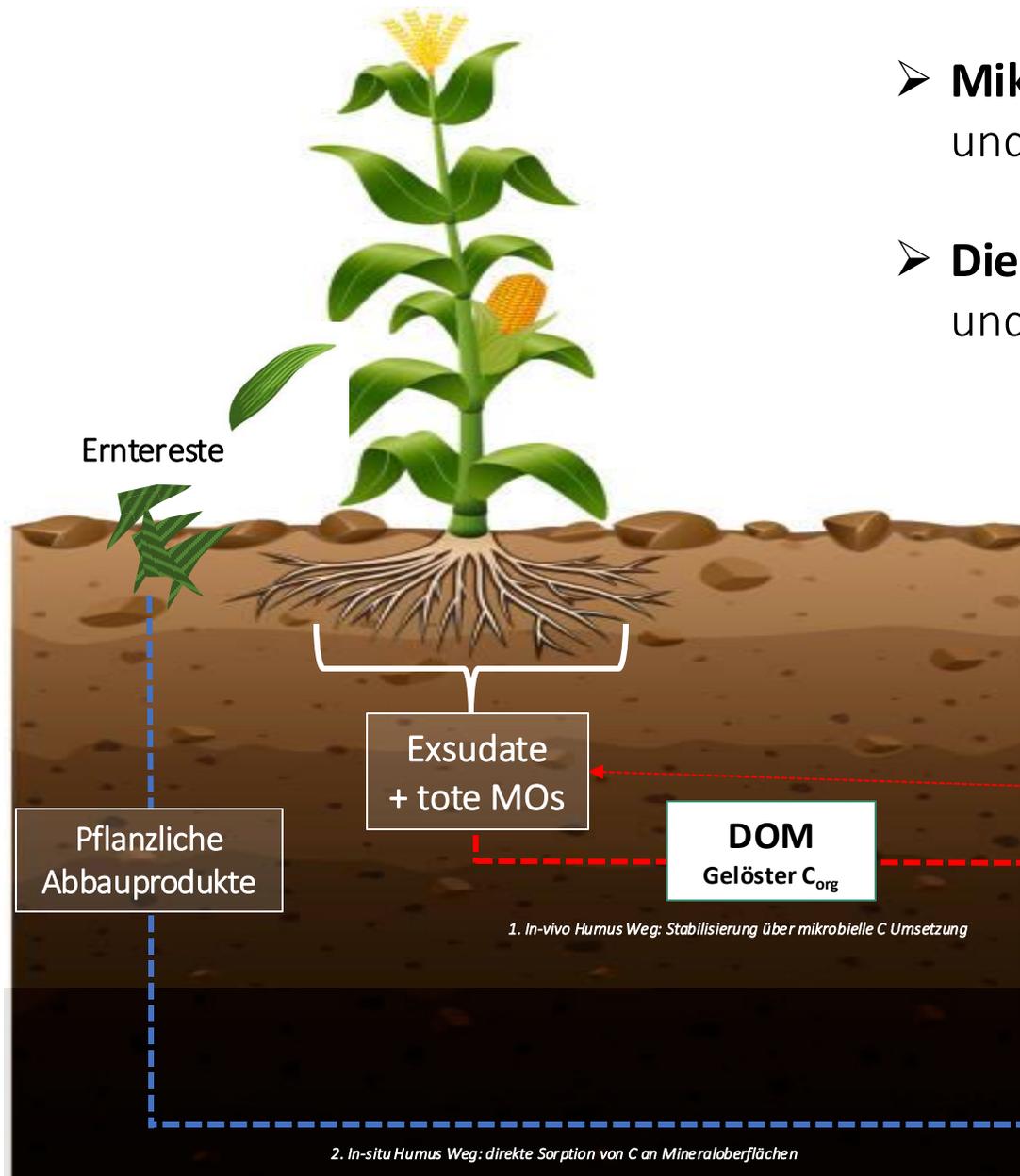
C

C

C

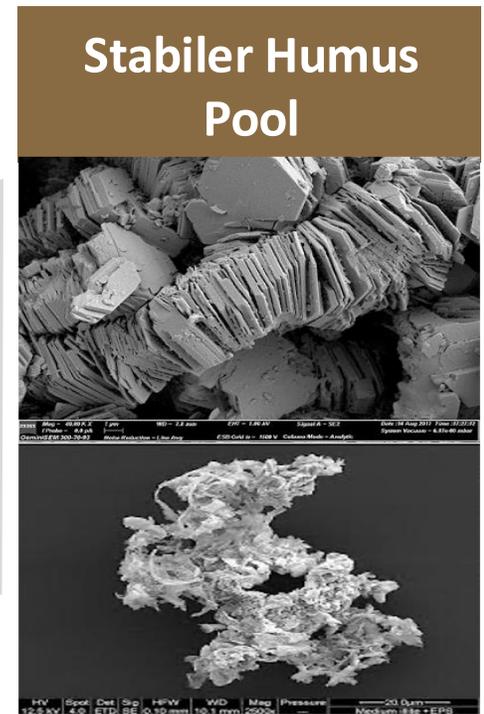


- **Mikrobielle C Umsetzung** ist der wohl wichtigste Prozess für Auf- und Abbau von Humus !!!
- **Die C Umsetzungseffizienz** entscheidet zwischen CO₂ Veratmung und Humusaufbau --> wird durch Management beeinflusst !!!



Mikrobielle Kohlenstoffnutzungseffizienz
= Veratmung vs. Wachstum

80 % der stabilen Humusfraktionen sind mikrobiellen Ursprungs



Stabile Aggregate

Bodenstruktur



- **Bodenstruktur ist Schlüssel für Humusaufbau-und Erhalt**
- **Wichtigster Indikator: Aggregatstabilität, Porenraum, Gefüge**
- Maßnahmen: Reduzierte Bodenbearbeitung, viel lebende Wurzeln, lange Begrünungen, ev. Kalkung

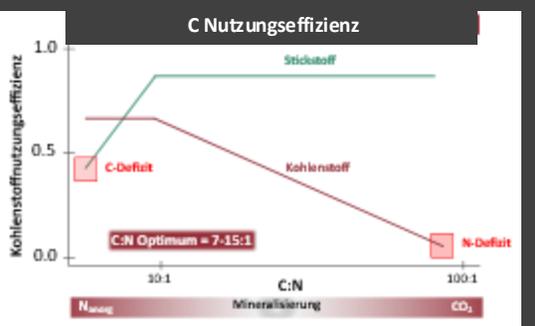
Pflanzendiversität

Mikrobiologie



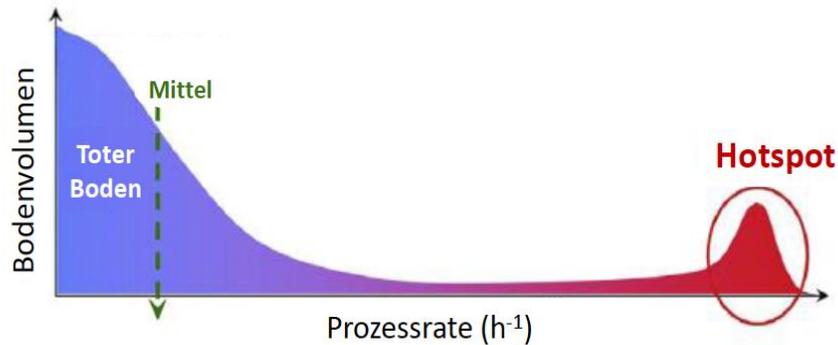
- **Vielfältige C-Inputs von Pflanzen tragen zum Humuserhalt bei**
- Maßnahmen: Wurzelstarke Kulturen einsetzen, Untersaaten, unterschiedliche Pflanzenfamilien bei FF und ZF berücksichtigen

Kohlenstoffnutzungseffizienz



- **Humusaufbau braucht Stickstoff**
- **C:N von Pflanzen an C:N der vorherrschenden Mikrobiologie anpassen (Pilz-oder Bakterienlastig) --> C:N 7-15**
- Maßnahmen: Viele Feinwurzeln, viel lebende Vegetation, Leguminosen...

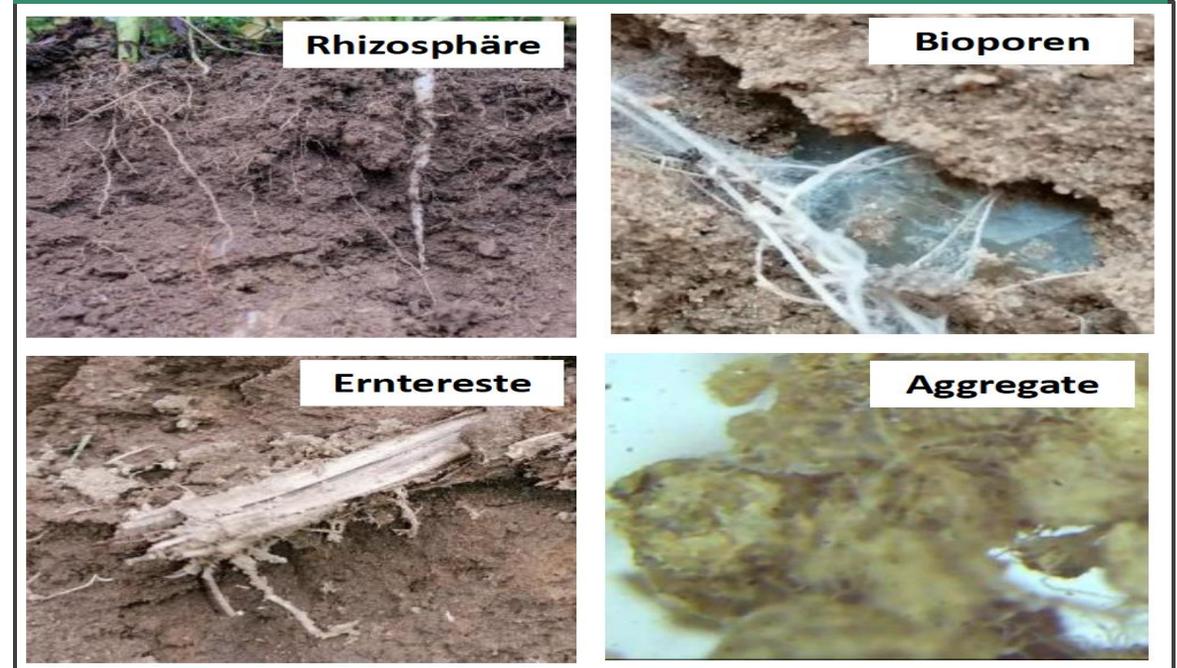
Wo leben Mikroorganismen?



	„Toter“ Boden	Hotspots
Relatives Volumen	10...100	1
Prozessrate	1	10...100

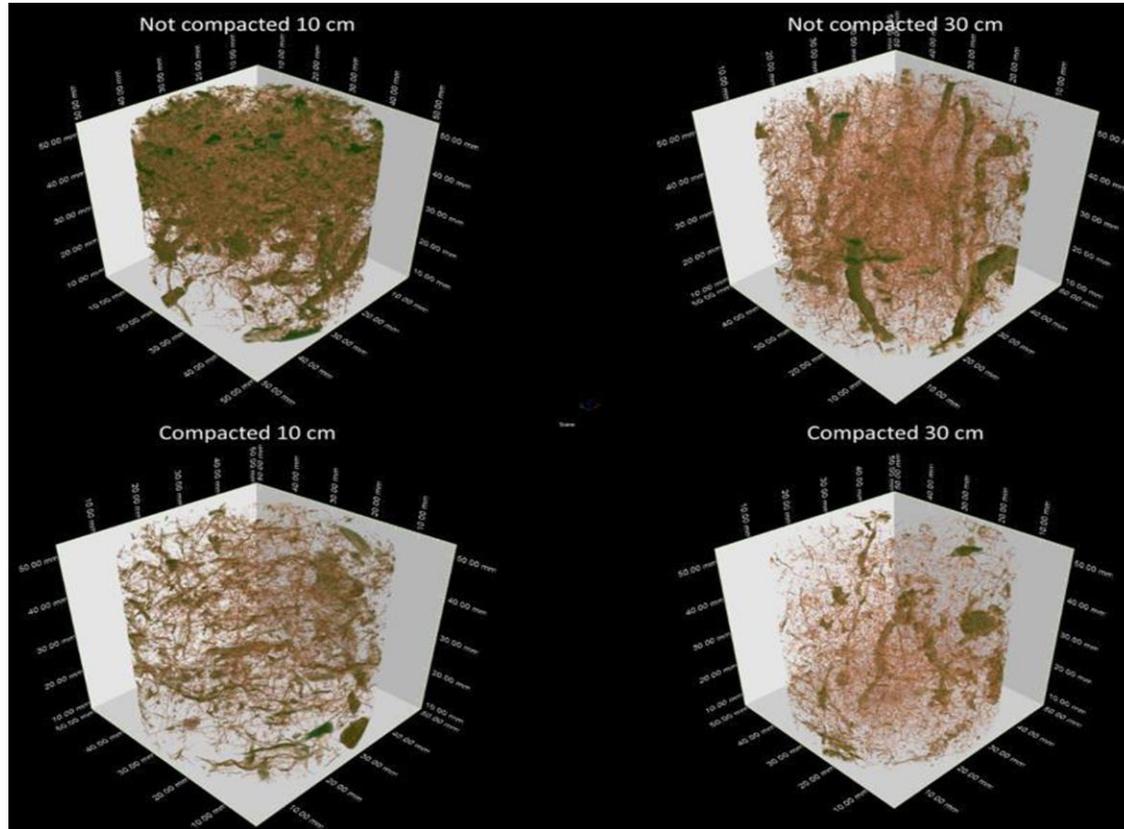
- Mikroorganismen leben in nur in 1-10% des Bodenraumes. Davon sind nur etwa 10-20 % aktiv

Mikrobielle Hotspots erkennen



- Die höchste MO Aktivität ist in der Rhizosphäre. Je größer die Rhizosphäre, desto mehr wird Humus gefördert

Die Bodenstruktur ist der wichtigste Hebel im Humusaufbau



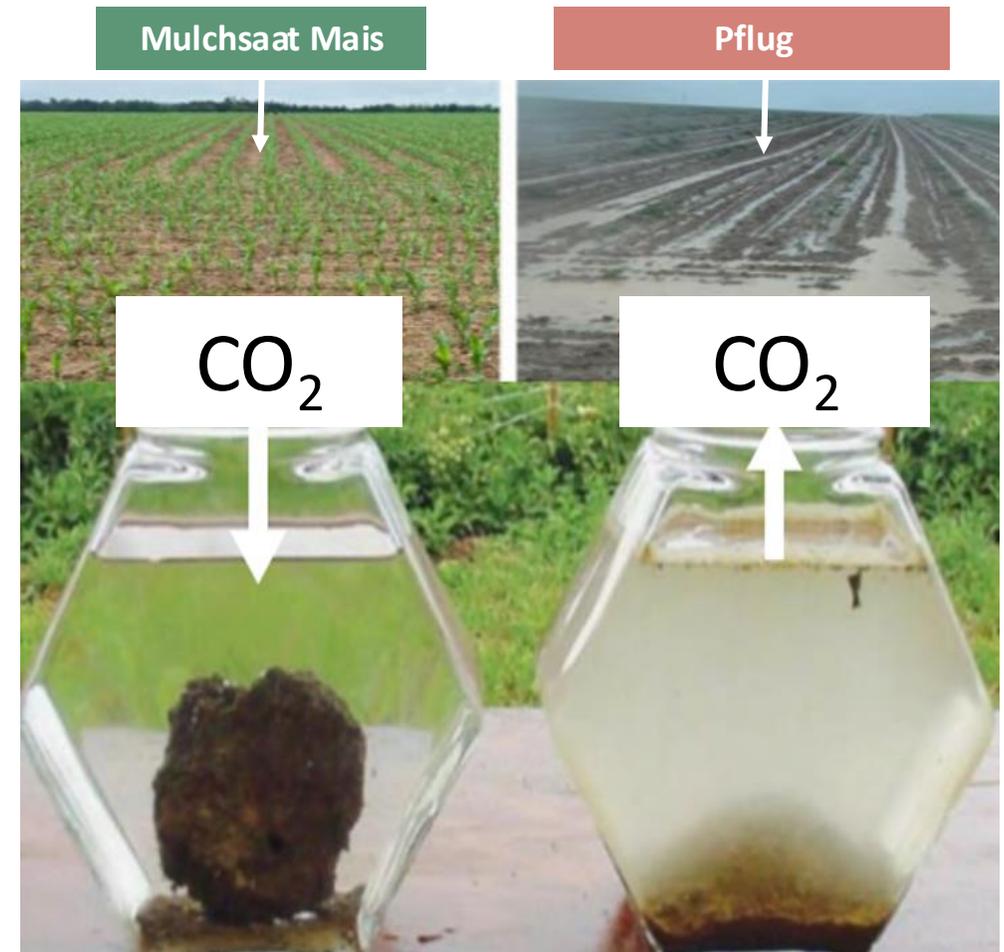
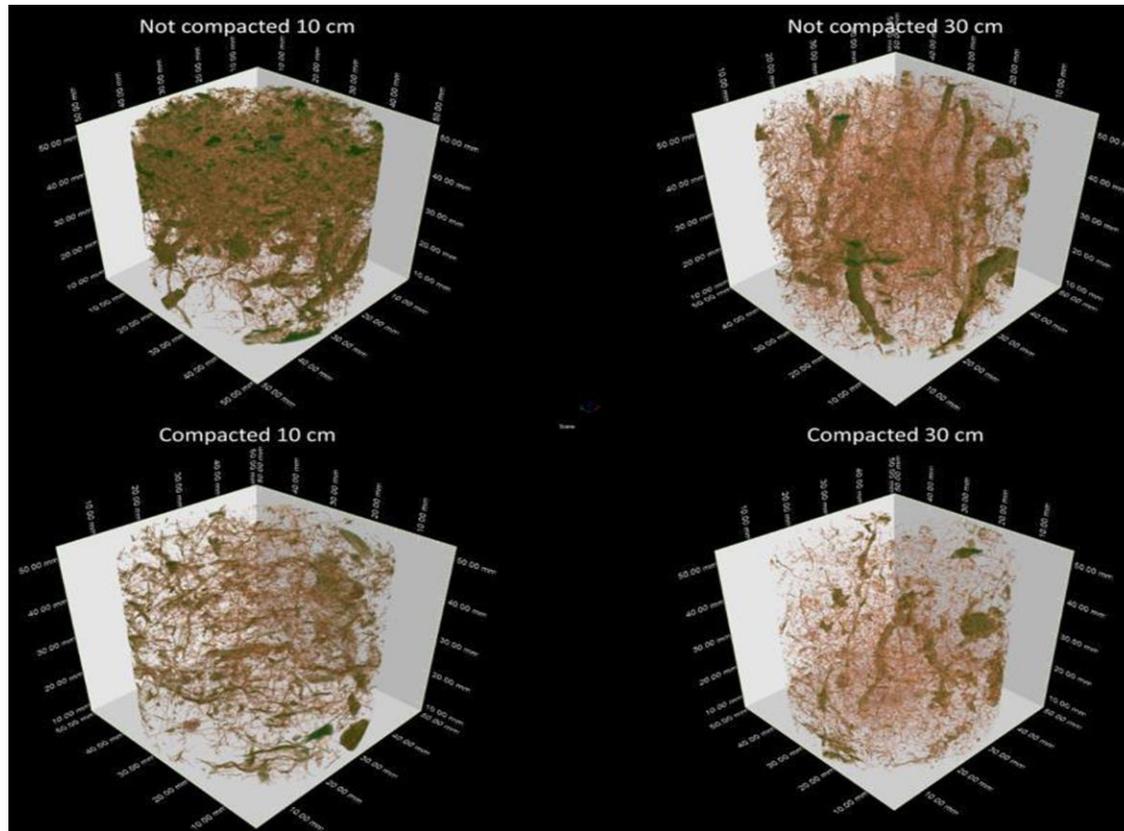
Menon et al (2020) Geoderma 366

Mulchsaat + ZF

Pflug



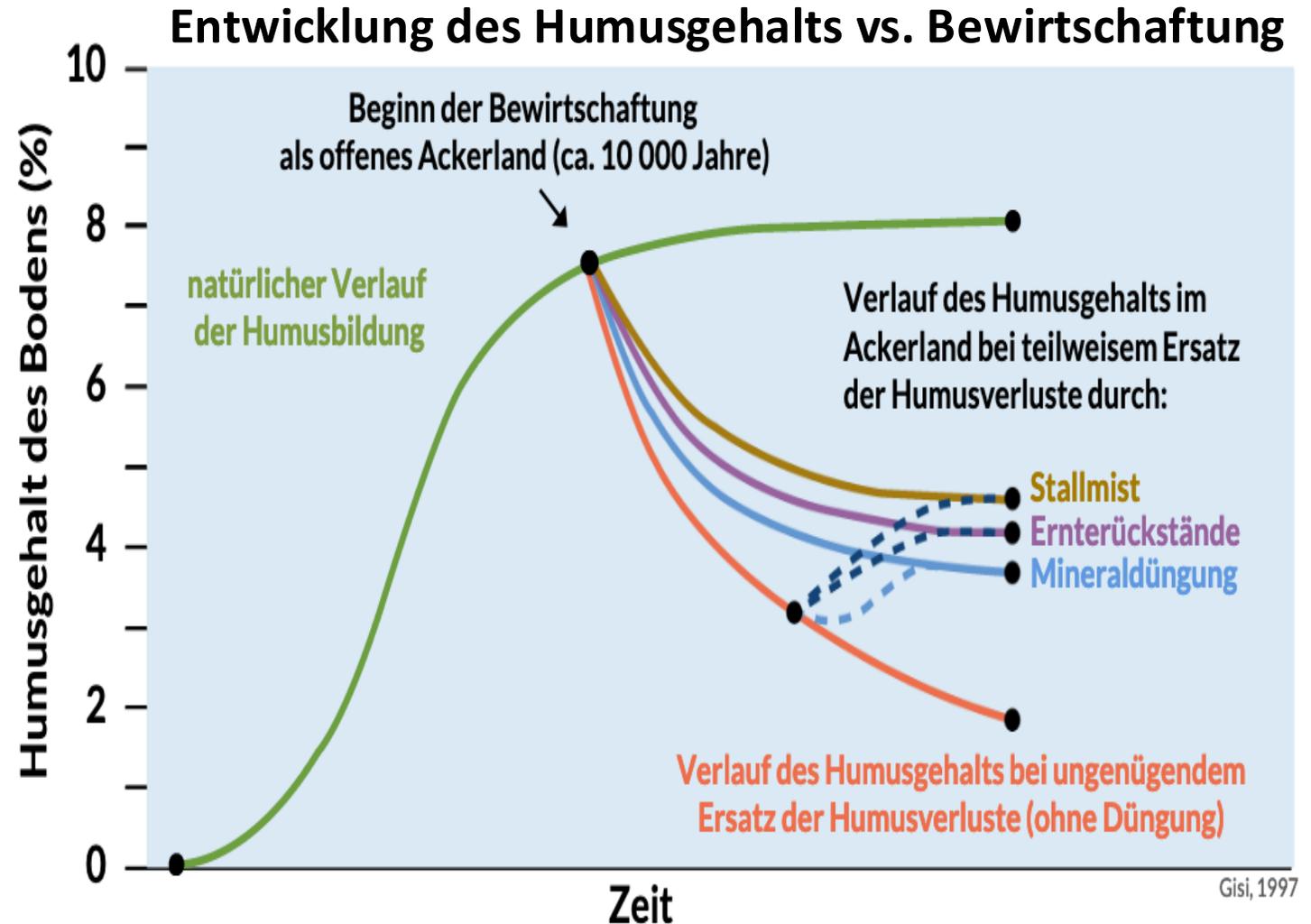
Die Bodenstruktur ist der wichtigste Hebel im Humusaufbau



Humusaufbau ist begrenzt und braucht Zeit...



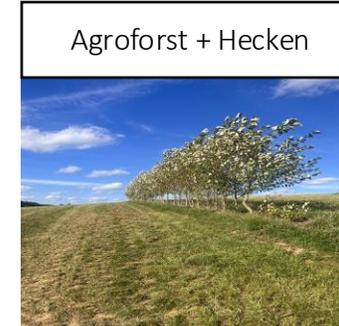
- Je höher der Humusgehalt desto schneller die Umsetzung
- Es braucht mehr C-Nachlieferung, um das Level zu halten
- Humus kann daher nicht beliebig im Boden gesteigert werden



Welche Maßnahmen bringen wieviel...

Boden als C-Senke = Wieviel ist möglich ? (t C ha⁻¹ Jahr⁻¹)

Wiesmeier et al. 2017; Don et al. 2020; Rodrigues et al., 2021

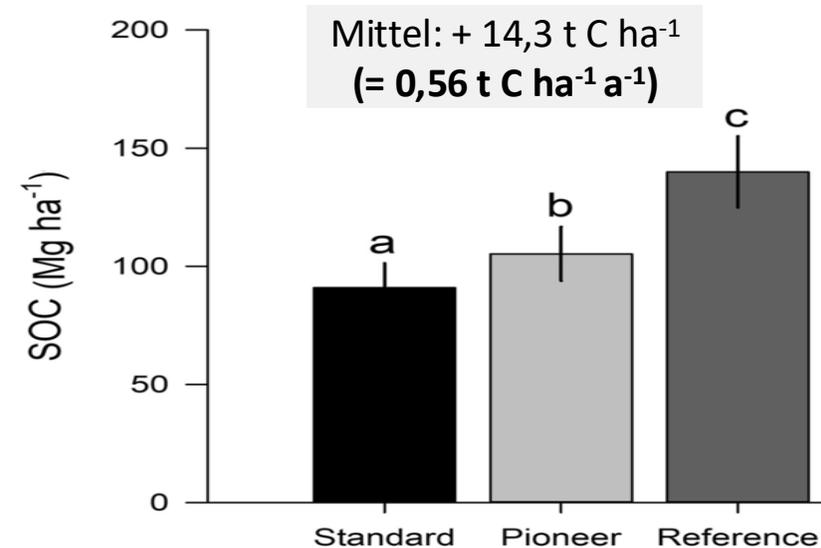


→ Realistische Aufbauraten: **0.2 – 0.8 t C ha/ Jahr = 0,7 – 3 t CO₂/ ha / Jahr** (+0.02-0.04 % Humus)

→ Würde 7 % der landwirtschaftlichen THG in Bayern ausgleichen!!! (Wiesmeier et al. 2017)

Boden.Pioniere Projekt zeigt:

- Langfristiger intensiver Humusaufbau funktioniert
→ 0,56 t C / ha / Jahr
→ v.a. durch Begrünungen und reduz. BB
- Realistische Aufbauraten aber weit unter theoretischen Standortpotentialen !!!



Rosinger et al. 2022

Kriterien für die Zertifizierung

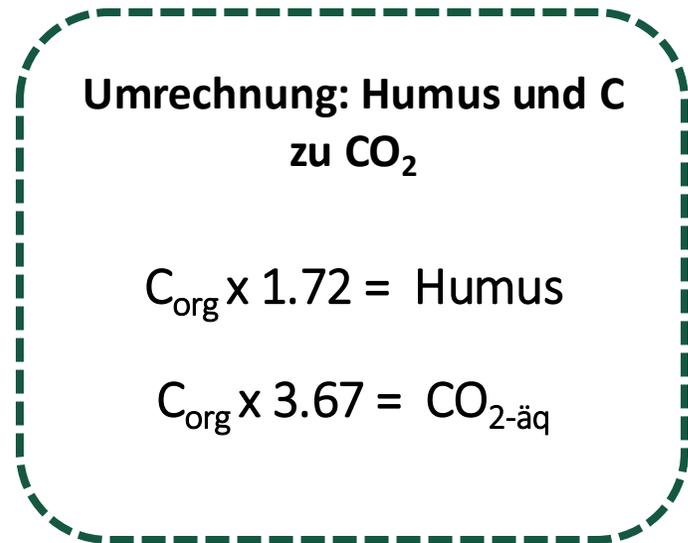
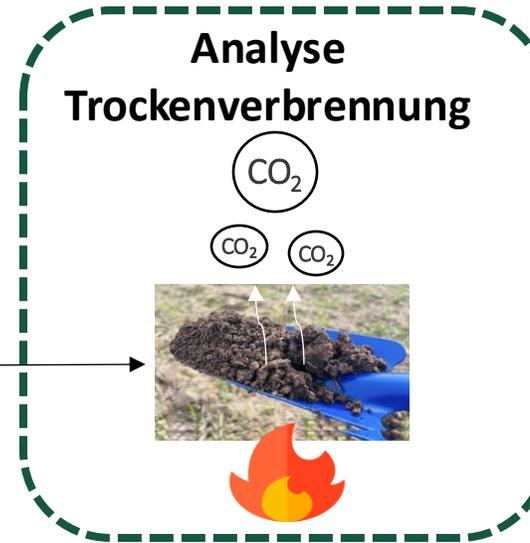
- Kann man C im Boden überhaupt messen ?

LD = Lagerungsdichte | S = Steinanteil

$$C_{org}\text{-Vorrat (t ha}^{-1}\text{)} = C_{org}(\%) \times LD \times \text{Tiefe} \times (1 - S) \times 100$$

Wiesmeier et al.
2020

Probe = Feinboden (g) < 2 mm

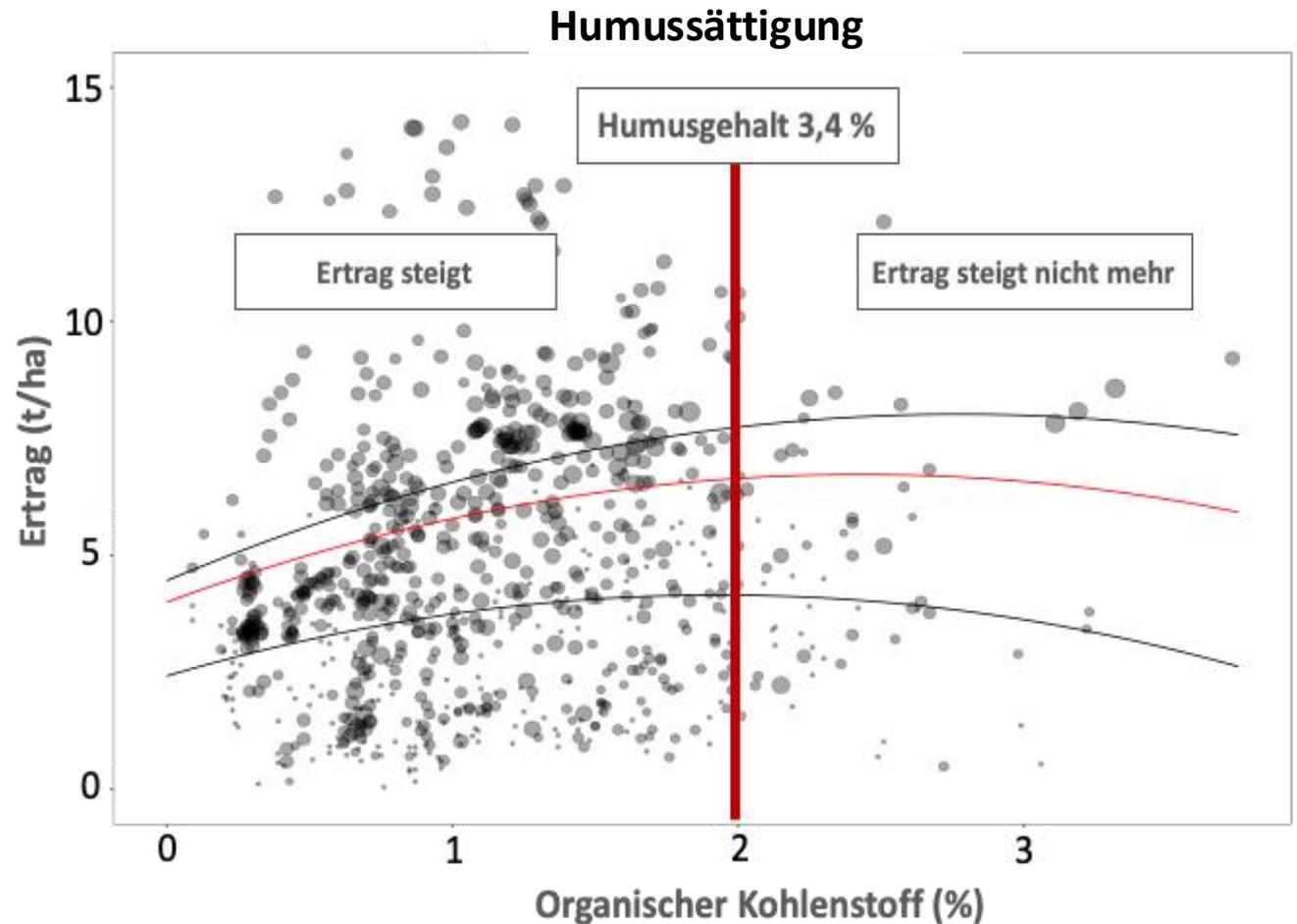


- C als Messparameter hat wenig Aussagekraft für Funktionen (=Qualität) von Humus im Boden
- C - Messfehler größer als realistische Aufbaurate / ha / Jahr im Boden (Fehler = ± 0.1 % C)
- **Mit aktuellen Methoden, kann C im Boden als Basis für „Emissionszertifikat“ nicht zuverlässig gemessen und keine Klimaschutzeffekt garantiert werden**

- Was ist der Klimaschutzeffekt von C im Boden?

Die Grenzen des Humusaufbaus

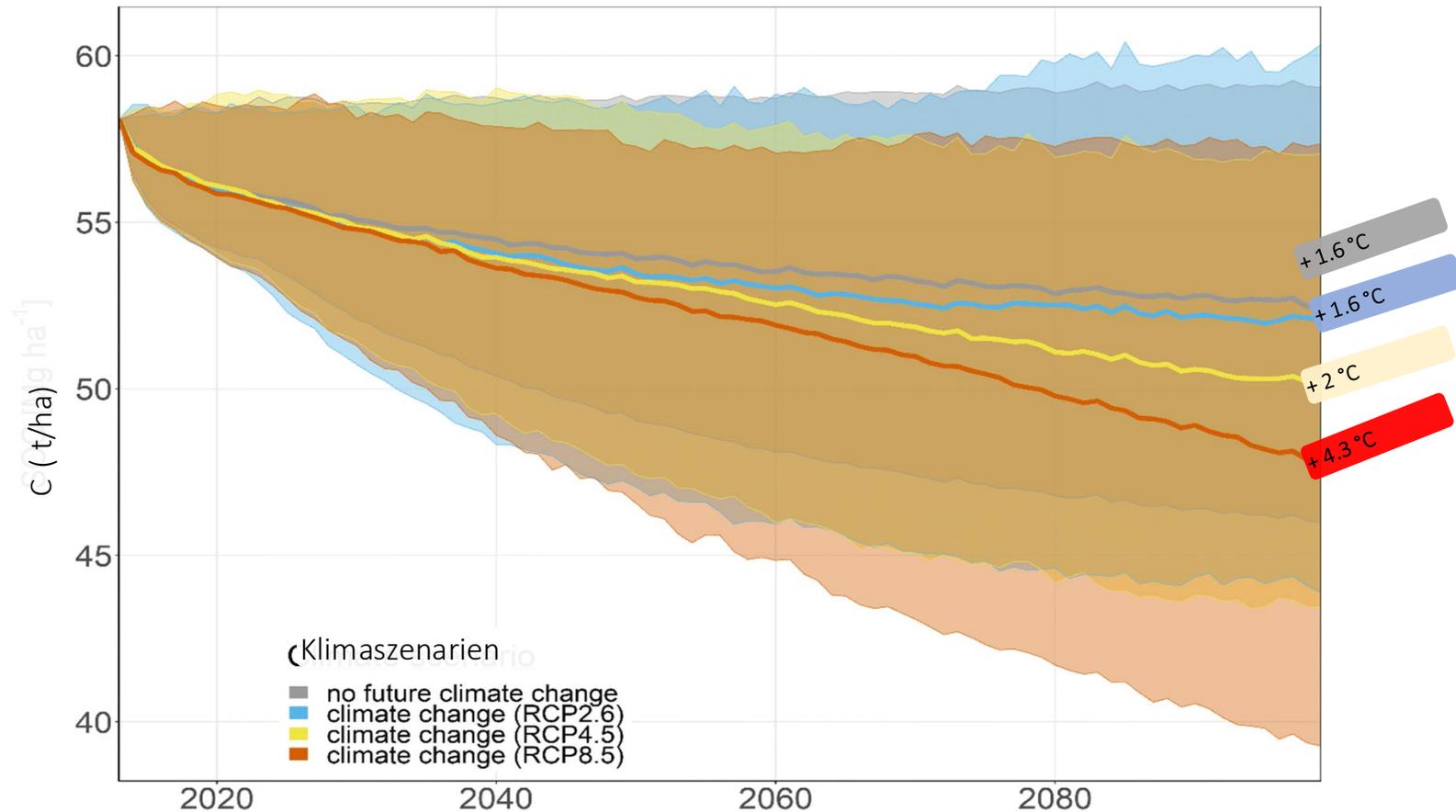
- Humusaufbau hat Grenzen:** Böden haben natürliche Speicherpotentiale für C
- Werden diese überstiegen kann es zu Emissionen und Verschlechterung von Bodenfunktionen kommen



- Ist mehr C im Boden eigentlich immer gut?

Langfristigkeit

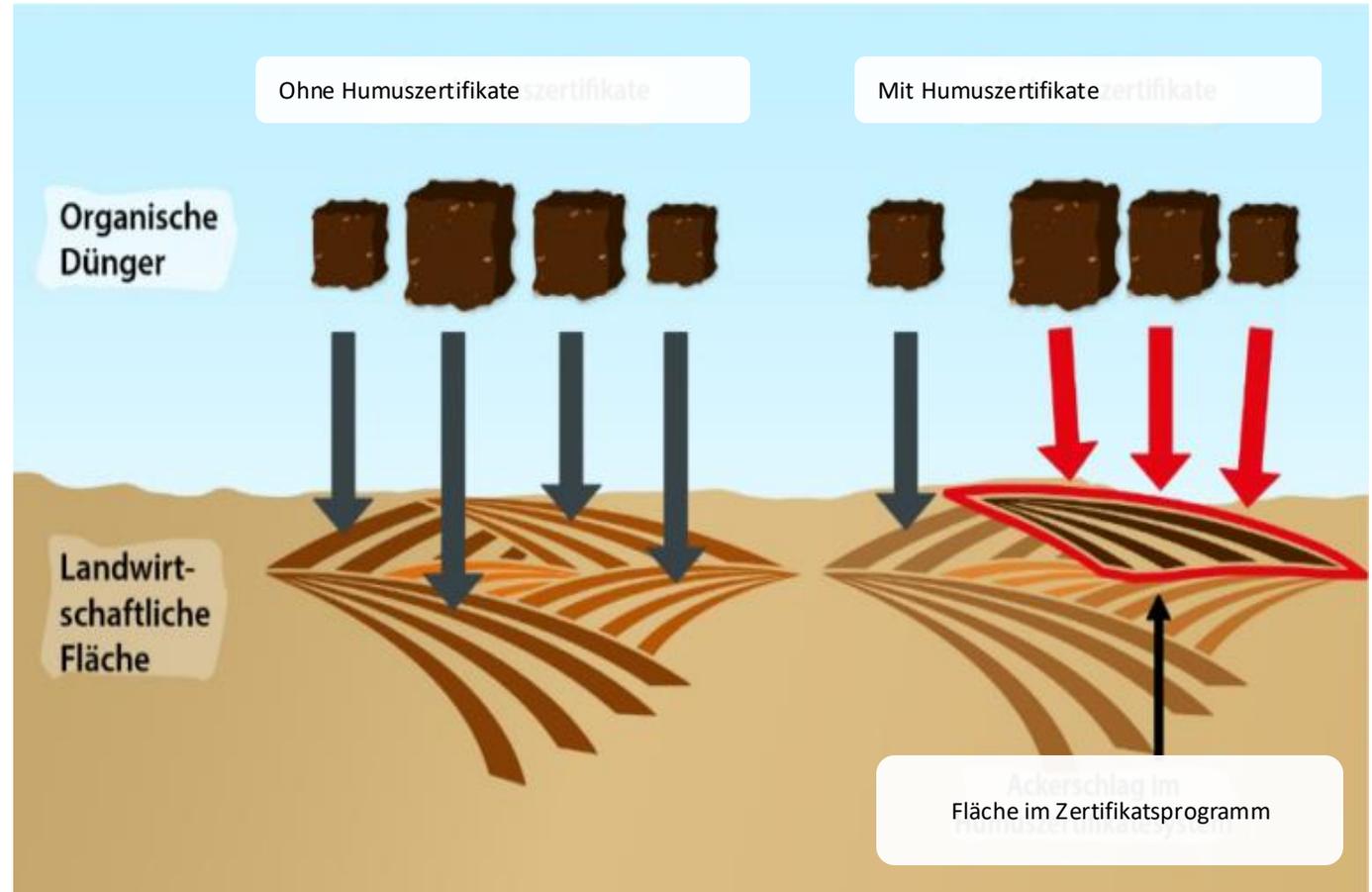
- **C kann im Boden nicht gesichert werden:** Durch die Klimakrise nimmt der Abbau generell zu
- + 51 – 91 % mehr C_{org} nur für Humuserhalt
- **Der Erhalt von C und Humus** im Boden ist eine dauerhafte Leistung und gehört auch honoriert!



- Ist mehr C im Boden eigentlich immer gut?

Zusätzlichkeit

- **Verlagerung von C ist kein zusätzlicher Klimaschutz !!!:**
Humusaufbau mit externen C-Quellen (Kompost, Kohle etc.) = Räumliche C Verlagerung – Kein Klimaeffekt



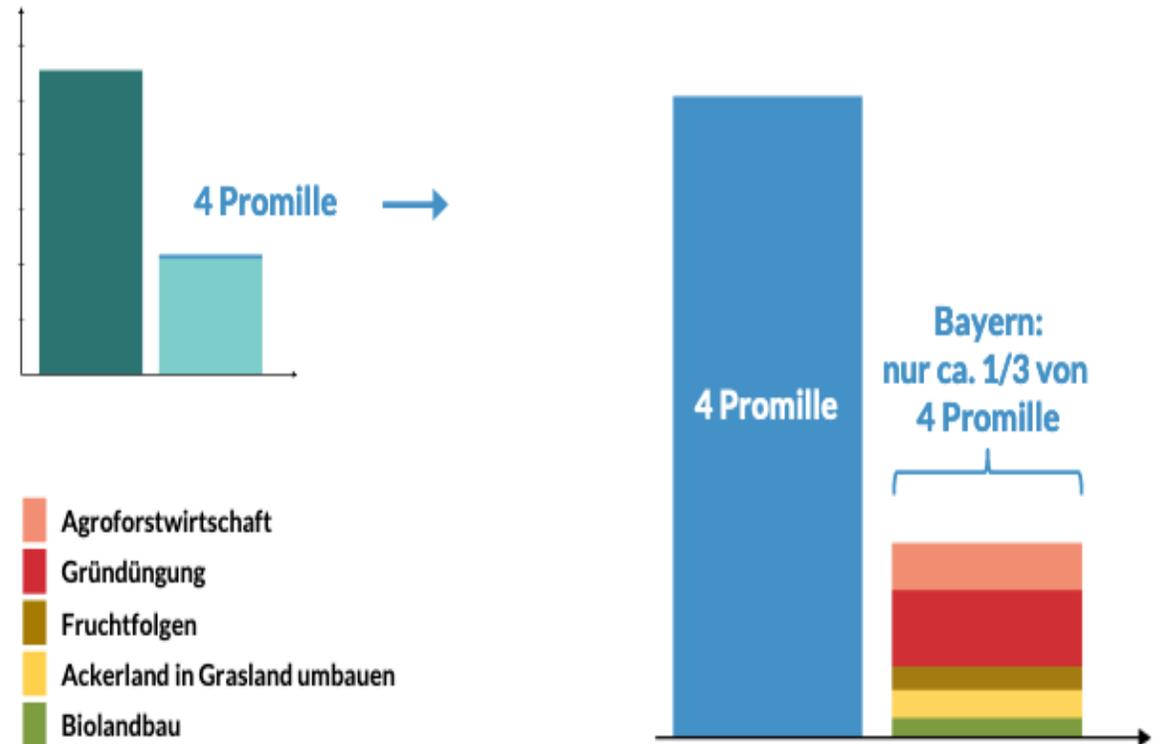
Kriterien für die Zertifizierung

- Was ist nun der Klimaschutzeffekt von C im Boden?

Nachhaltigkeit

- Boden als C-Senke limitiert:** Studien aus DE zeigen: Bei intensivem Humusaufbau könnten nur ca. 1,5 % der THG in Bayern kompensiert werden.
- Entspricht ca. 0,1 % C Aufbau/Jahr --> Das liegt weit unter dem erklärten **4perMille** Ziel

4-Promille-Initiative: Reality Check Bayern

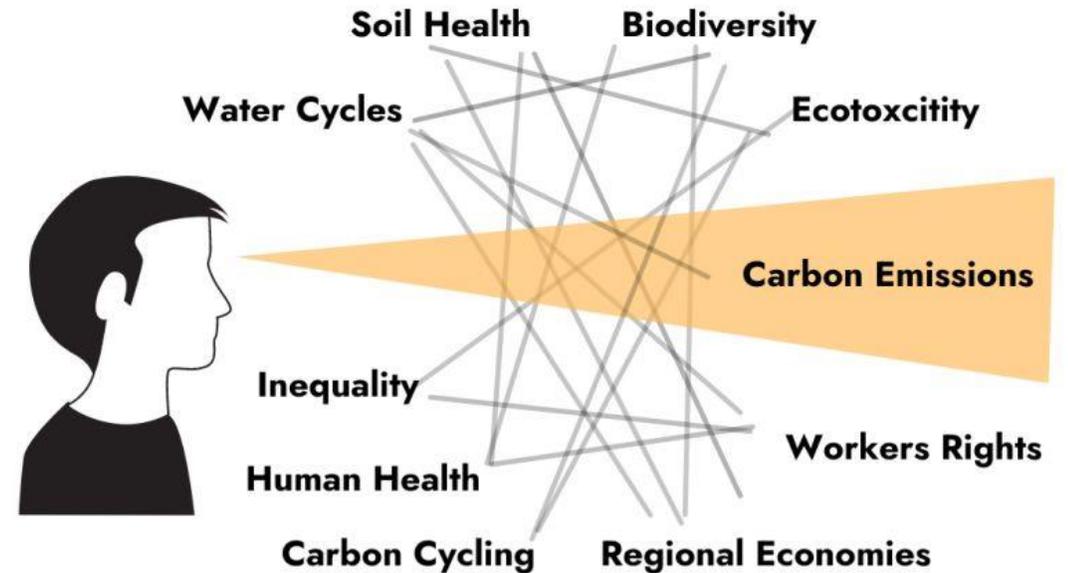


Ist C der richtige Indikator für die Klimakrise?



- Der starke Fokus auf C in der Bekämpfung der Klimakrise birgt das Risiko, dass essentielle Ökosystemfunktionen: Biodiversität, Wasser, Bodenschutz etc. vernachlässigt bzw. entkoppelt werden
- C und CO₂ sind reine Messparameter, die nicht per sé die Funktionalität von Ökosystemen beschreiben
- Relevant für Klima-und Landwirtschaft ist v.a. allem der Erhalt der Funktionen von Humus im Boden

Carbon Tunnel Vision





Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit