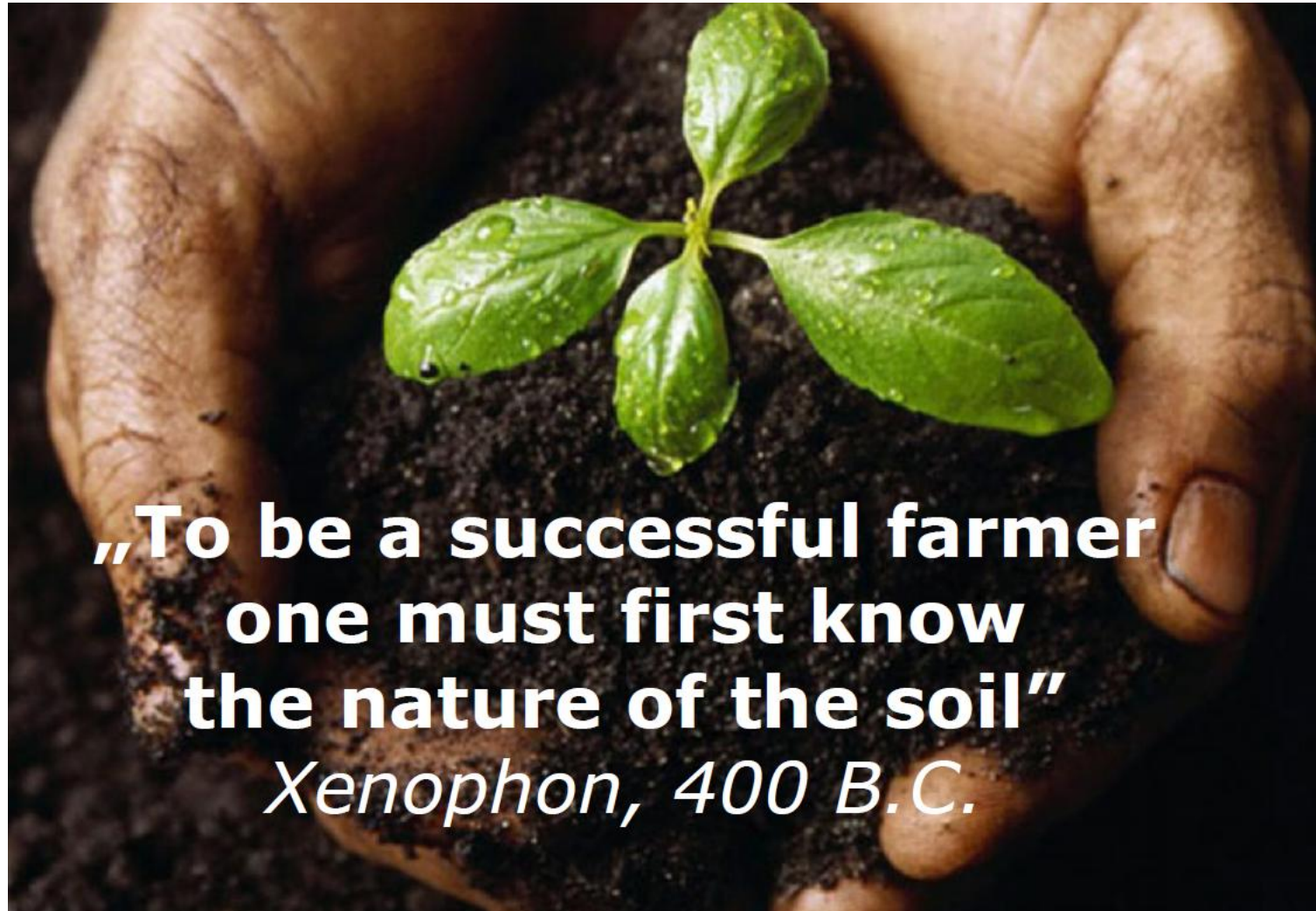


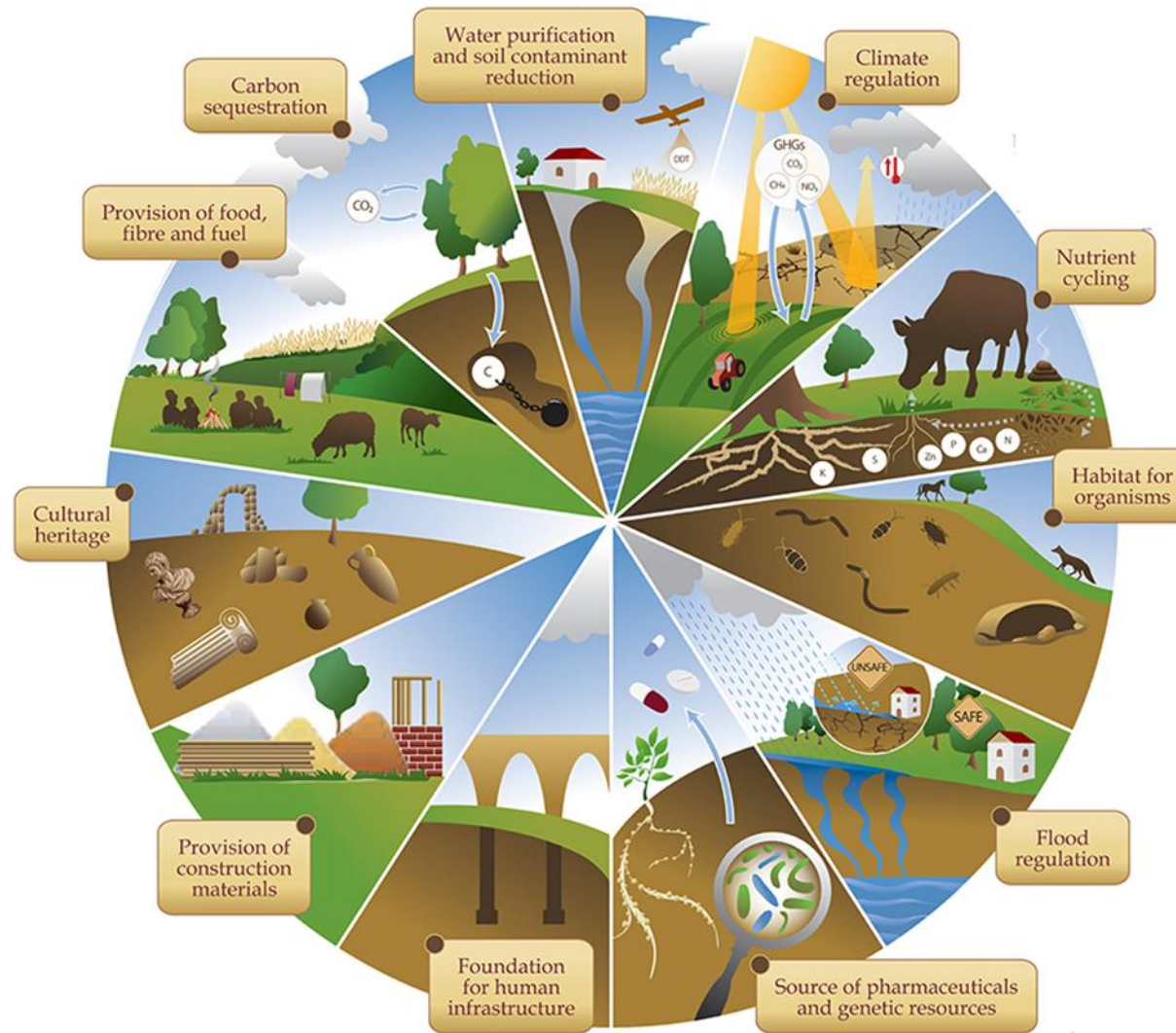
Unsichtbare Greenkeeper: Wie das Bodenmikrobiom Golfplätze gesund hält

Michael Schlöter
schlöter@tum.de
26. Nov 2025

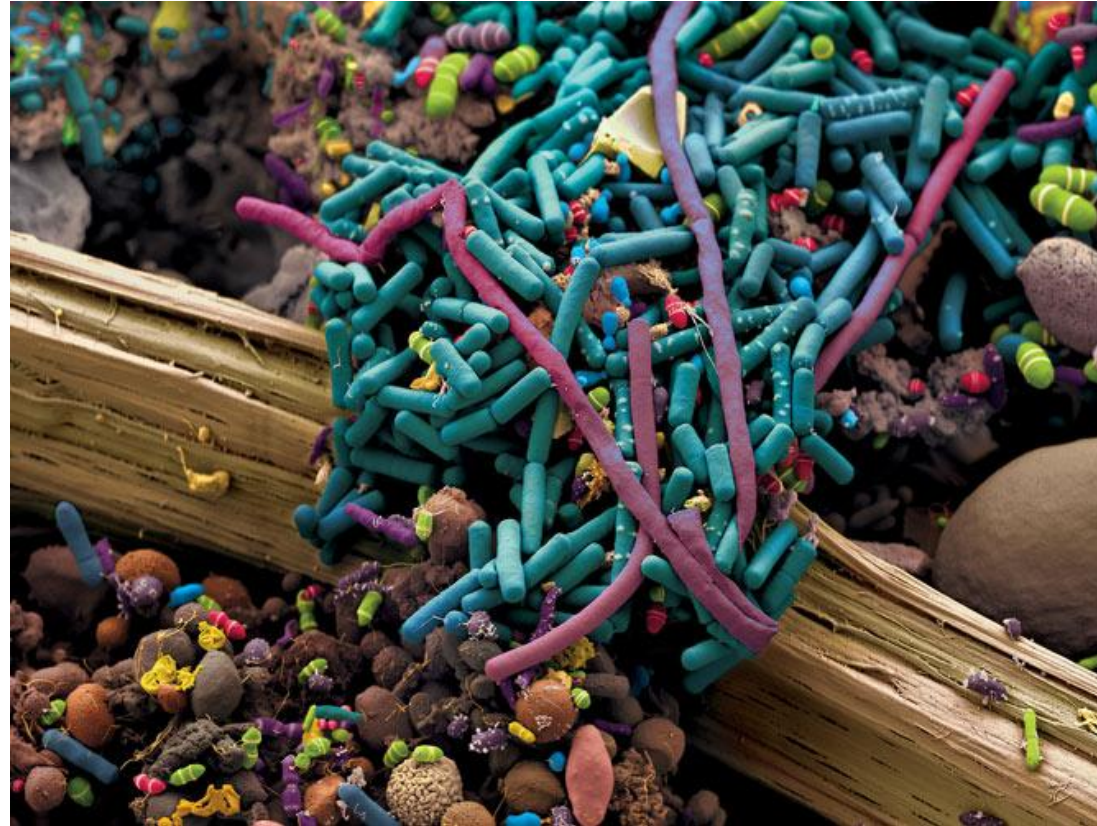




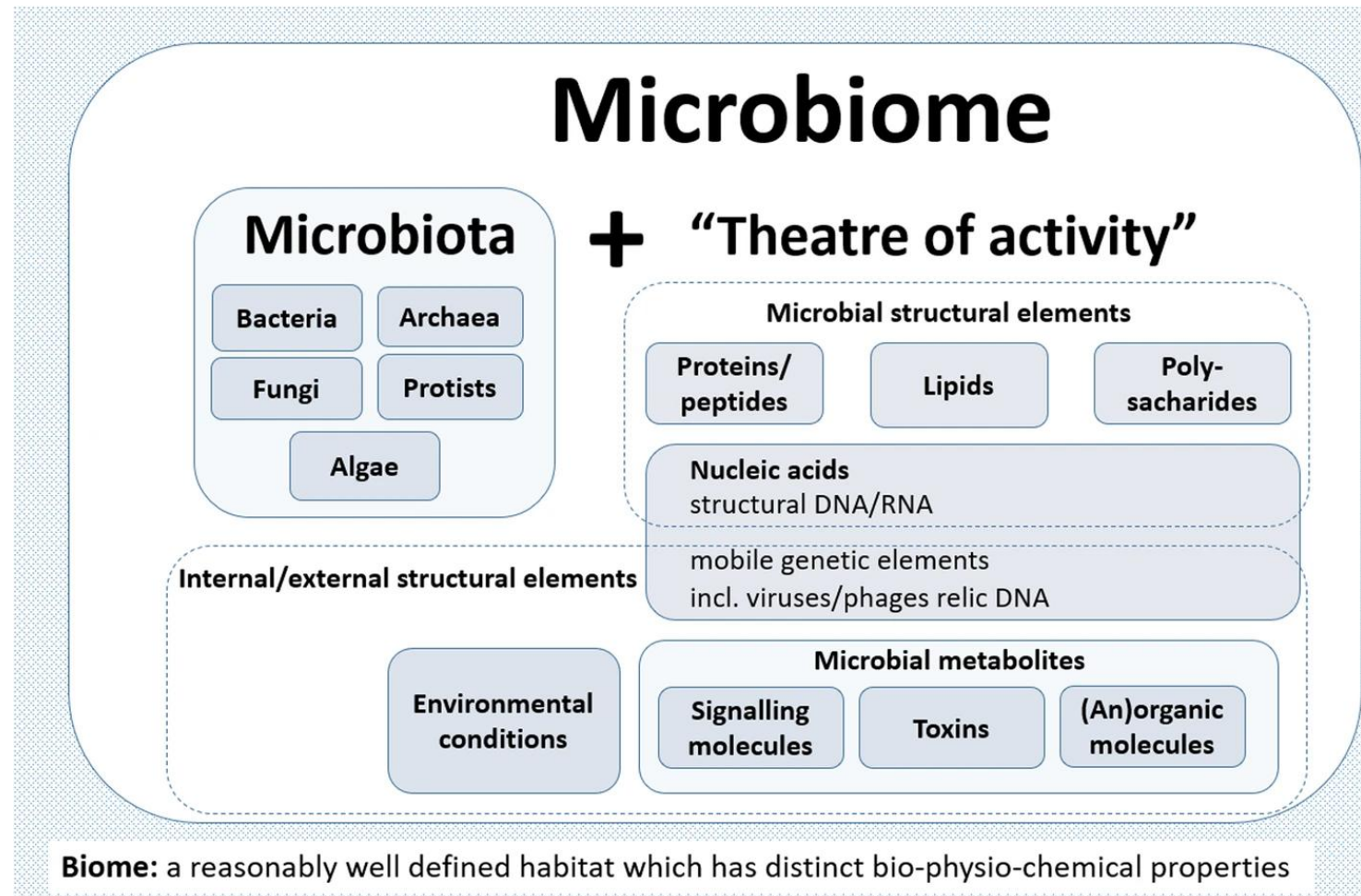
Mikroben und Ökosystemdienstleistungen



FAO, 2020



blog.sciencescape.org/



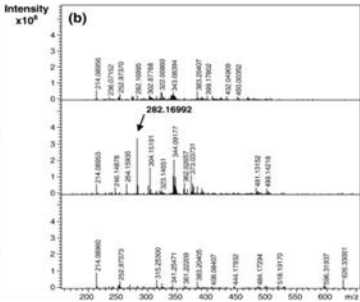
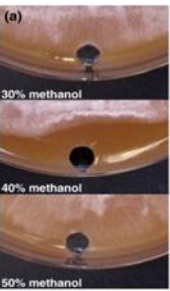
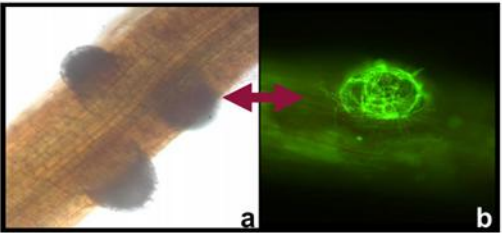
Berg et al., Microbiome 2020

Mikroben als zweites Genom der Pflanzen

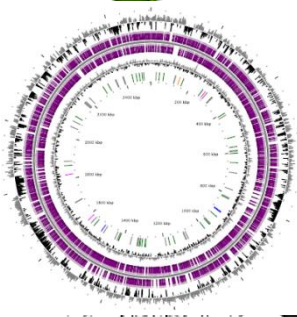


Plant probiotics
(PGPR)

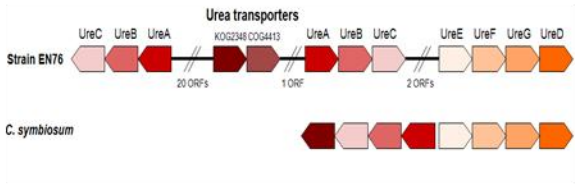
Water and nutrient uptake



Biocontrol of
phytopathogens

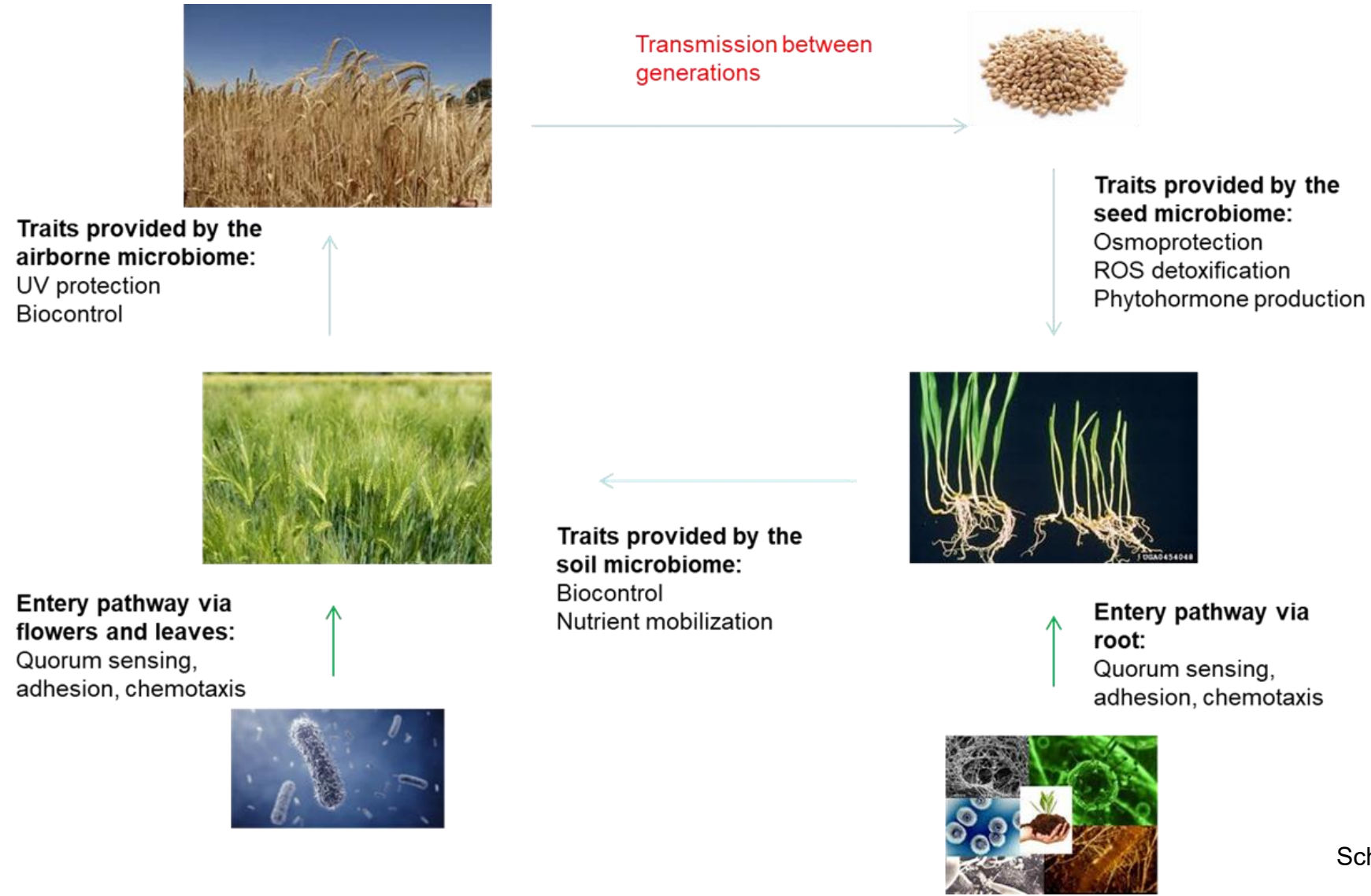


Nutrient
mobilization

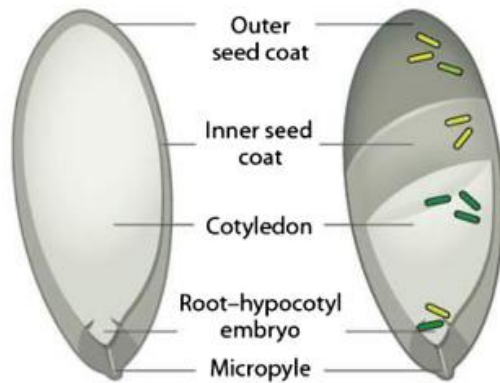


Berg et al., Front. Plan Sc. 2014

Selektive Rekrutierung nützlicher Mikroorganismen



Schulz et al. Env. Microbiome 2025



— Alphaproteobacteria
— Betaproteobacteria
— Gammaproteobacteria

Produce cytokinins that might play a role on plant germination

Annual ryegrass

Nutrient release for seedling – phosphate solubilization

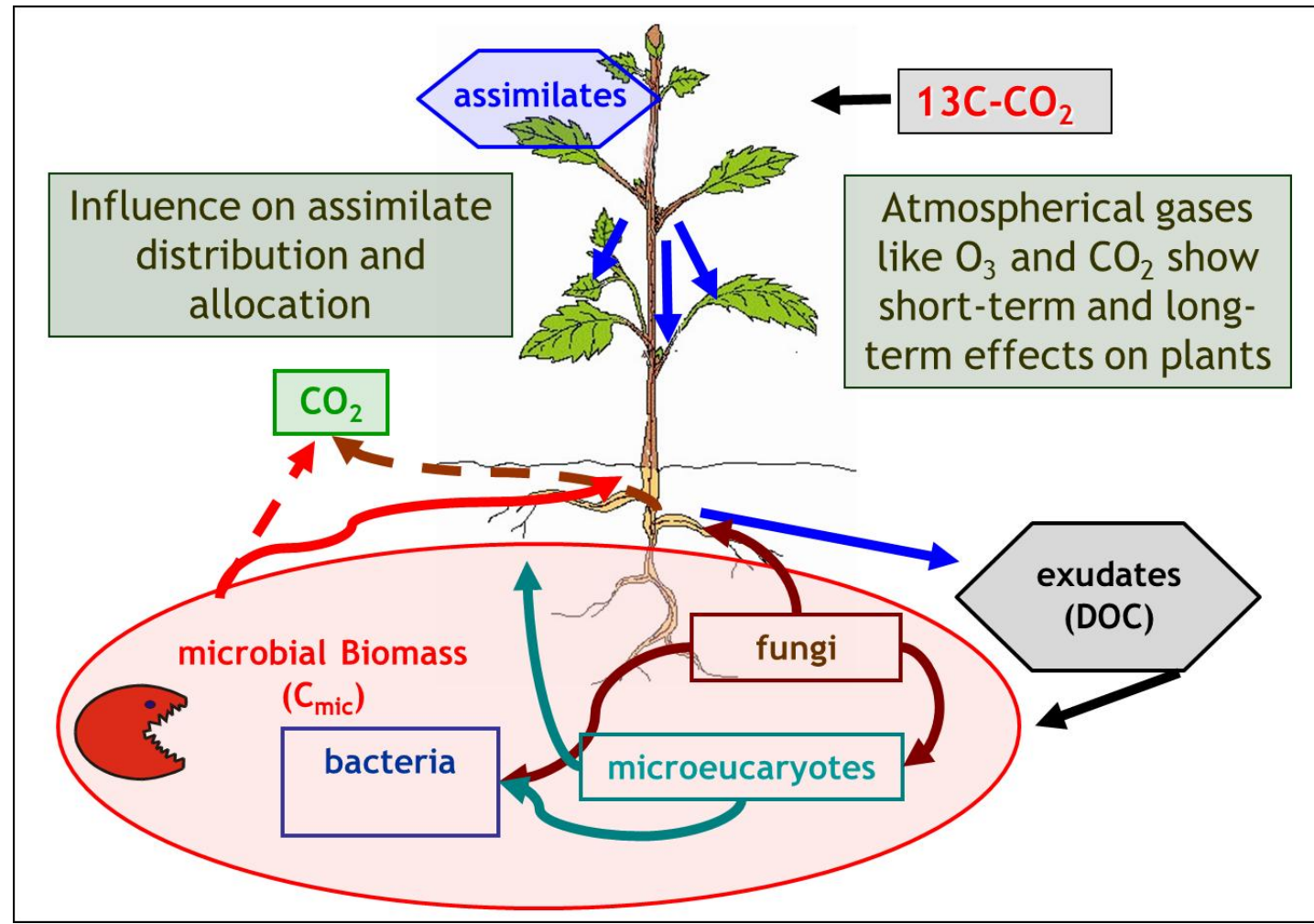
Mexican giant cardon

Produces antioxidative stress enzymes

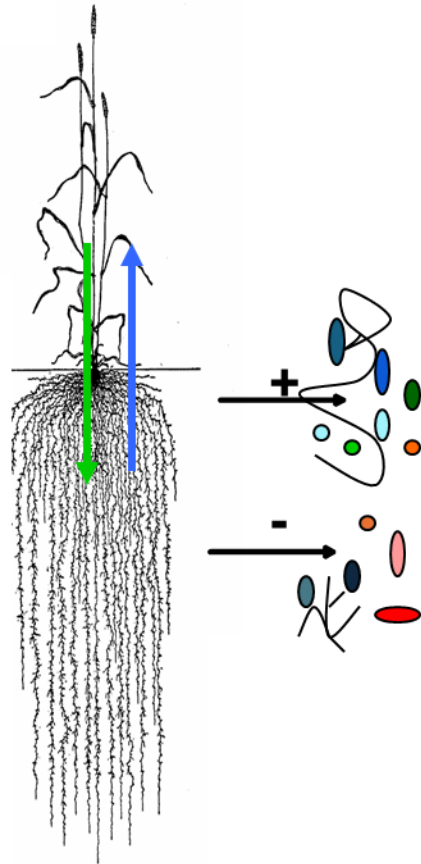
Quinoa

Glaser et al., FEMS Microb. Ecol. 2017

Selektive Rekrutierung nützlicher Mikroorganismen



Esperschütz et al. FEMS Microb Ecol, 2007



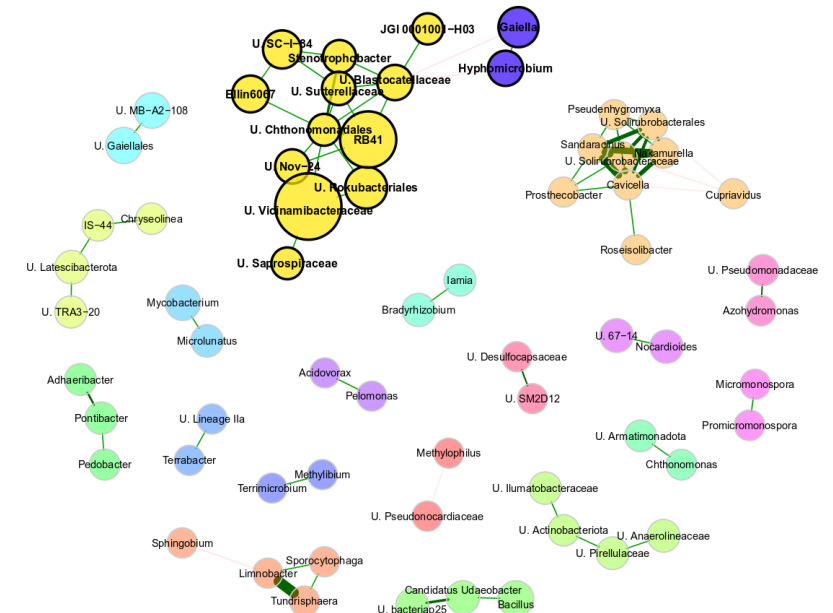
Stimulatory factors on rhizosphere microbes:

Carbon substances, vitamins, complexing agents, hydrogen, oxygen / reduction equivalents

Inhibitory factors on rhizosphere microbes:

Soluble and volatile antimicrobials, phenolic compounds etc.

Hartmann et al. FEMS Microb Ecol, 2025

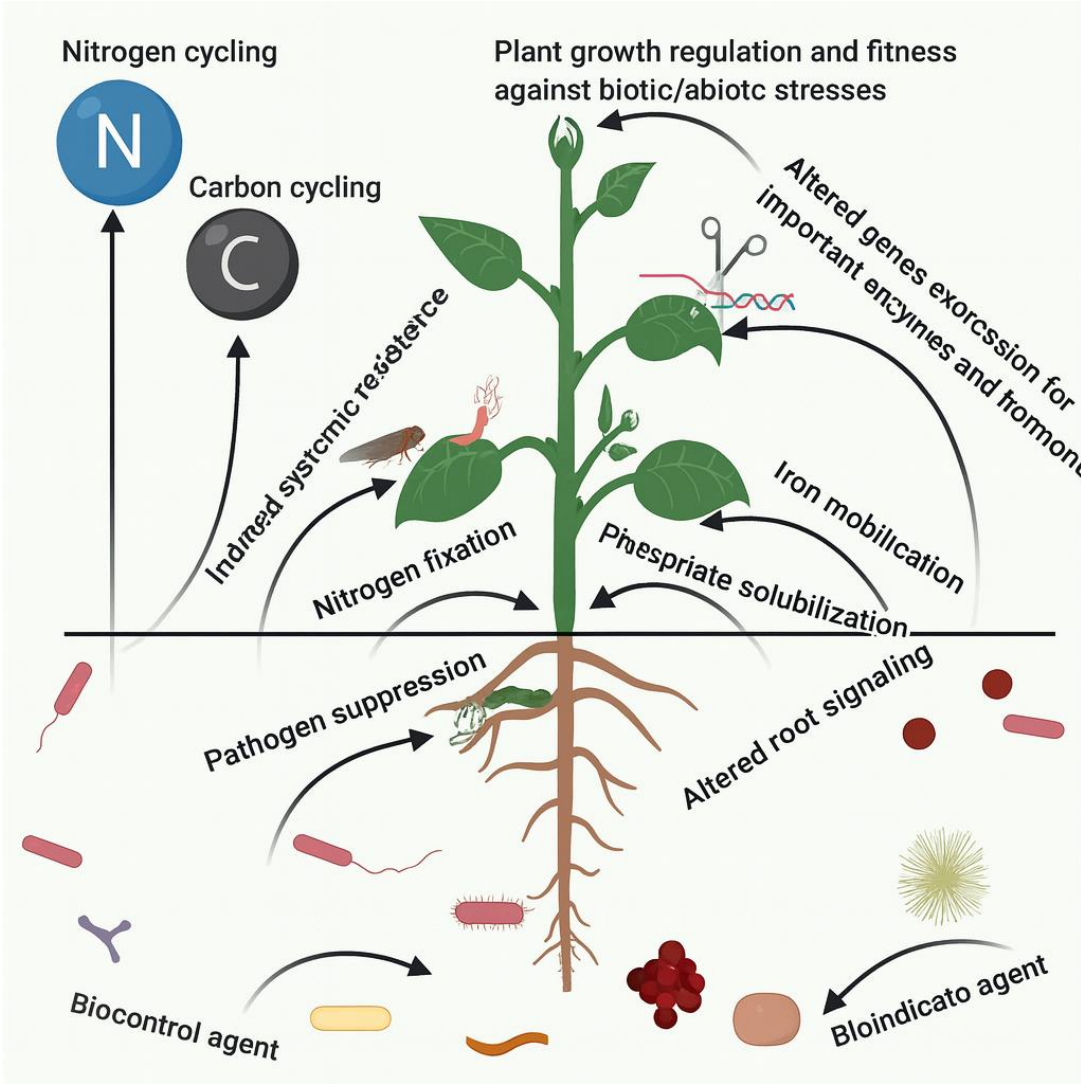
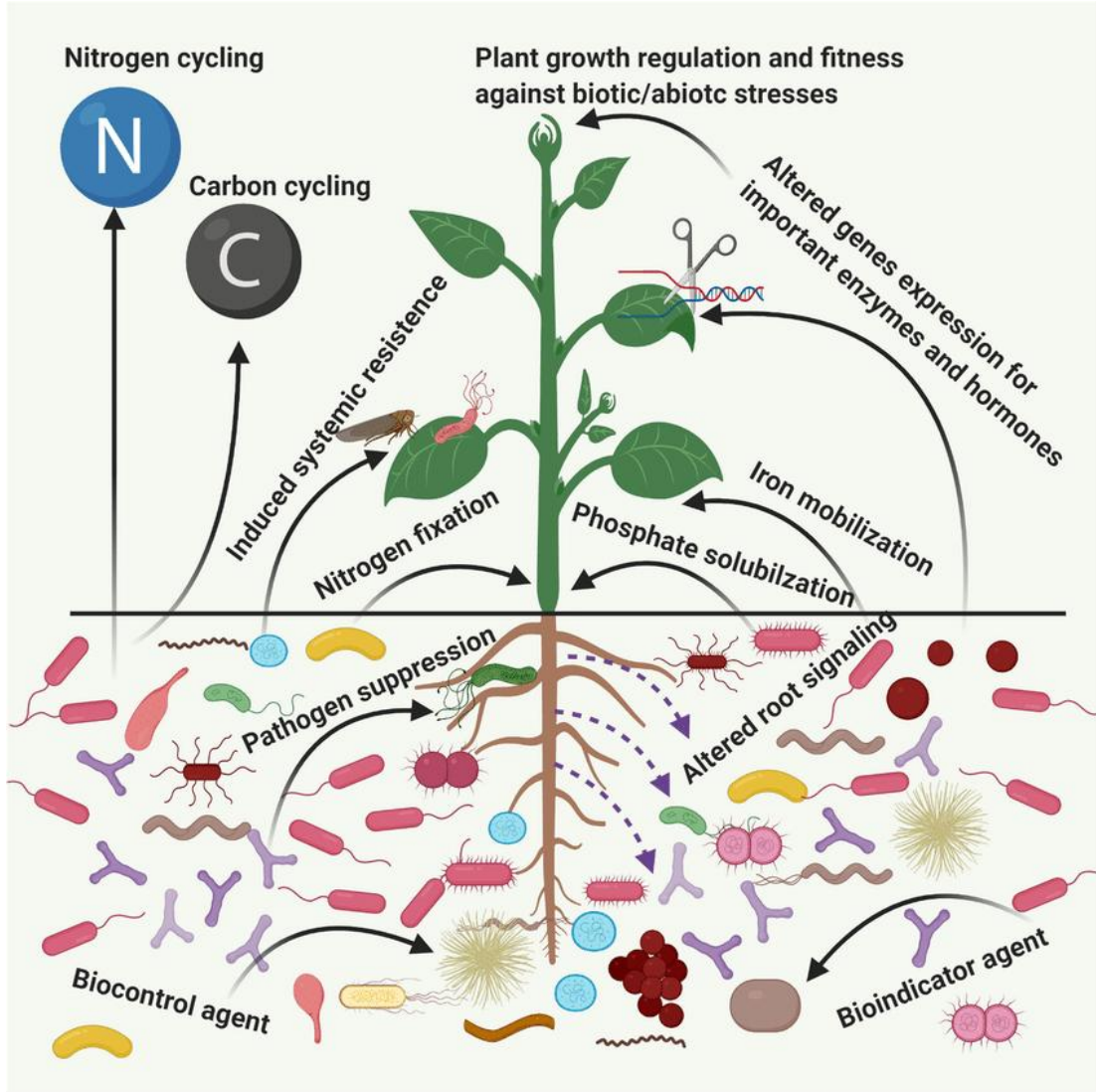
A portrait of a man with short, dark, curly hair and a beard, wearing a dark suit, white shirt, and a red tie. He is looking directly at the camera with a neutral expression.

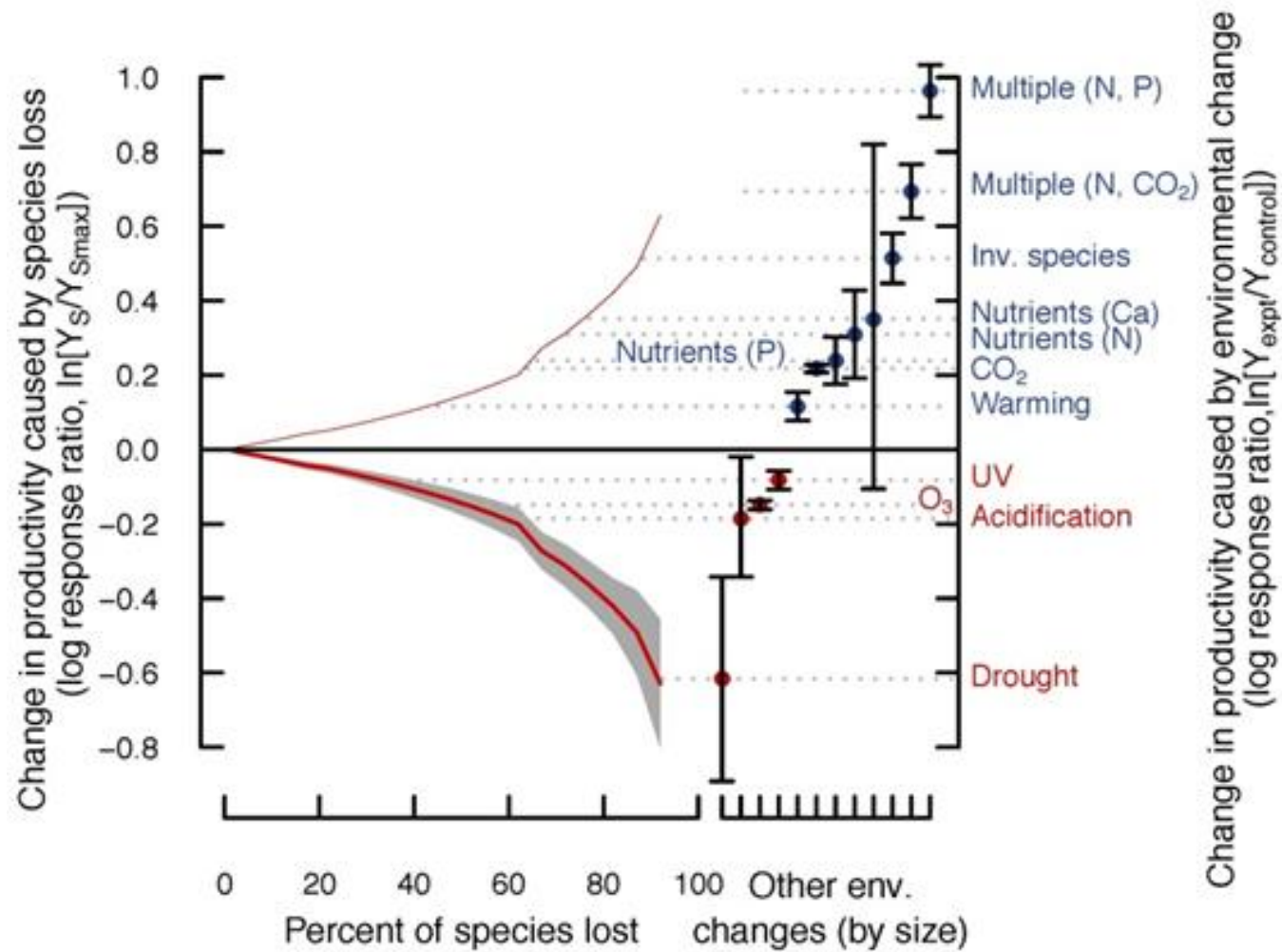
Network properties	High	Low
Nr. of components	386	422
Nr. of nodes	86	65
Clustering coefficient	0.59	0.55
Modularity	0.51	0.77
Positive edges (%)	87.06	89.19
Edge density	0.0019	0.0007
Robustness	0.0042	0.0025
Average path length	1.41	1.52
Nr. of modules	13	20



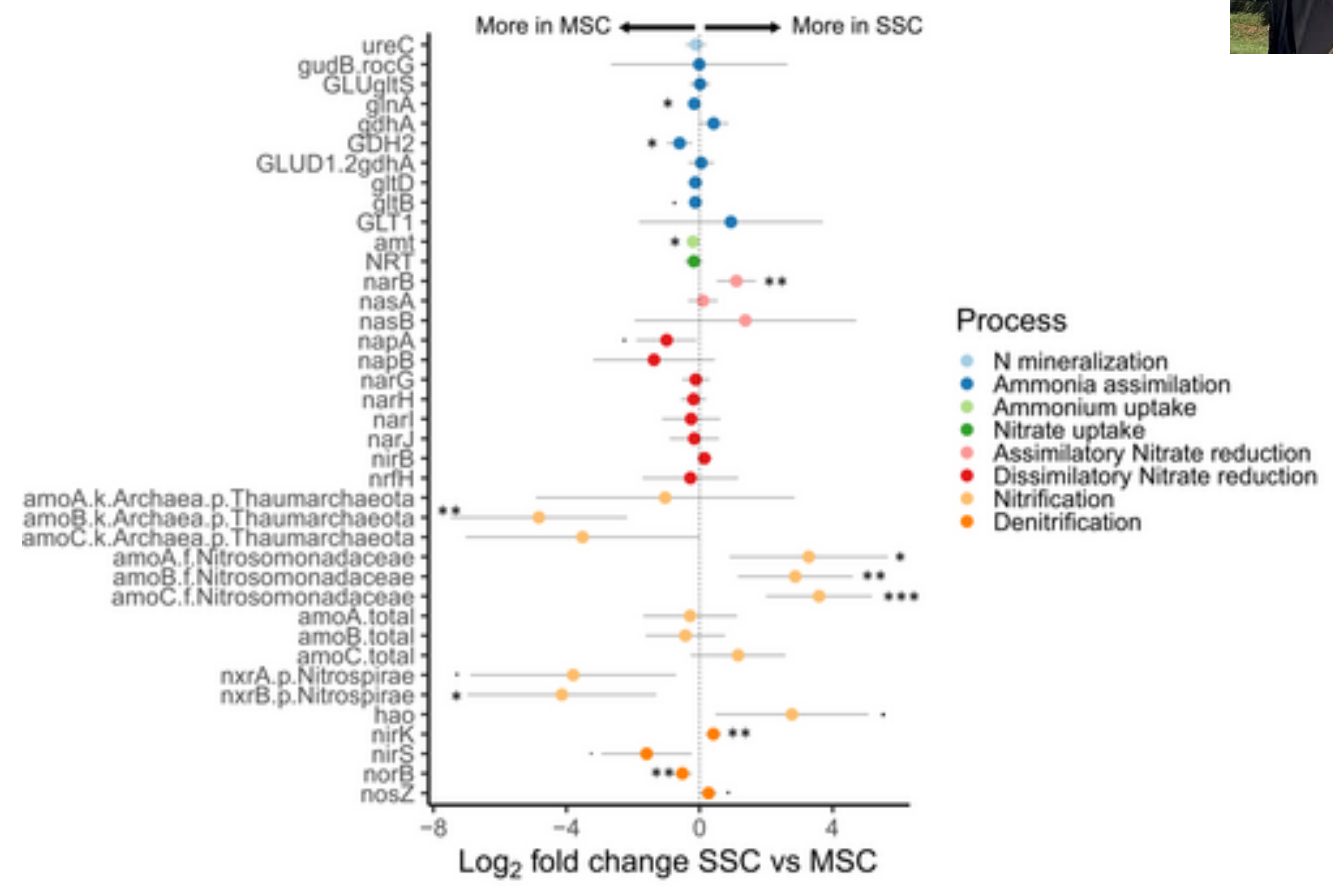
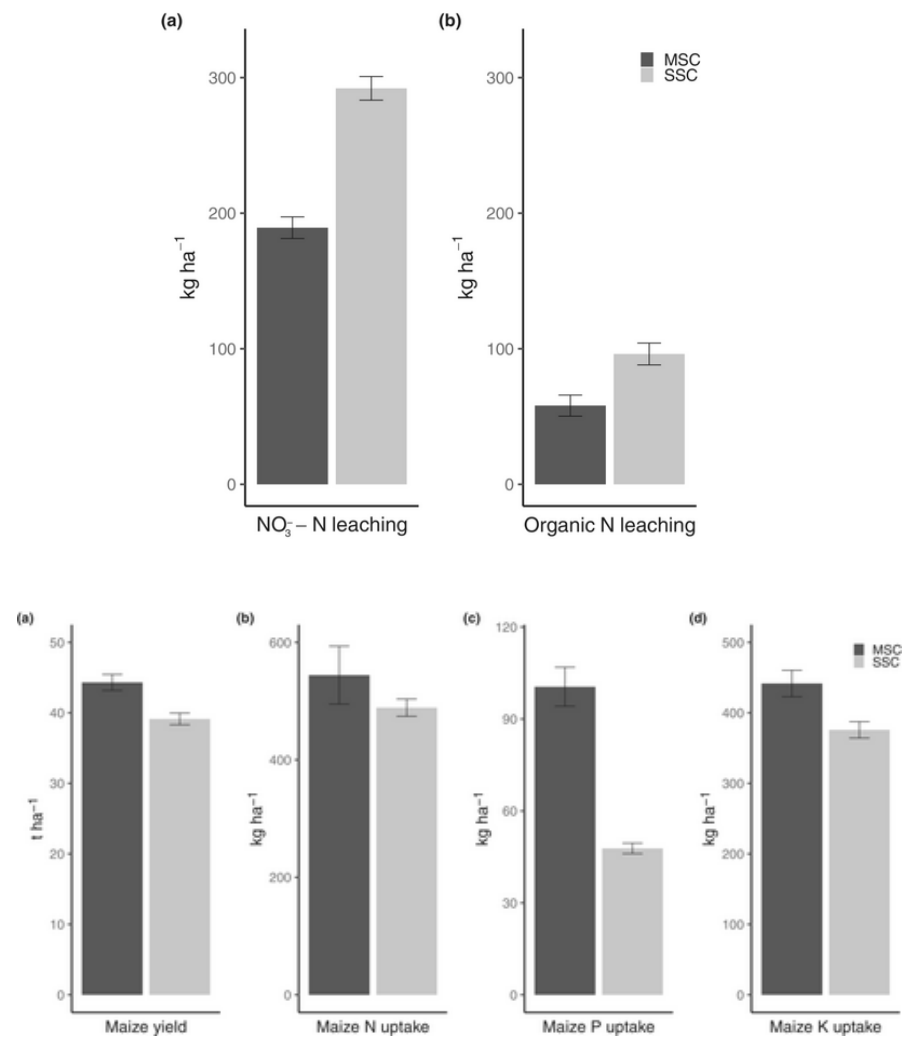
Technische Universität München

Mikroorgansimen des Bodens als Quelle für das Wurzelmikrobiom



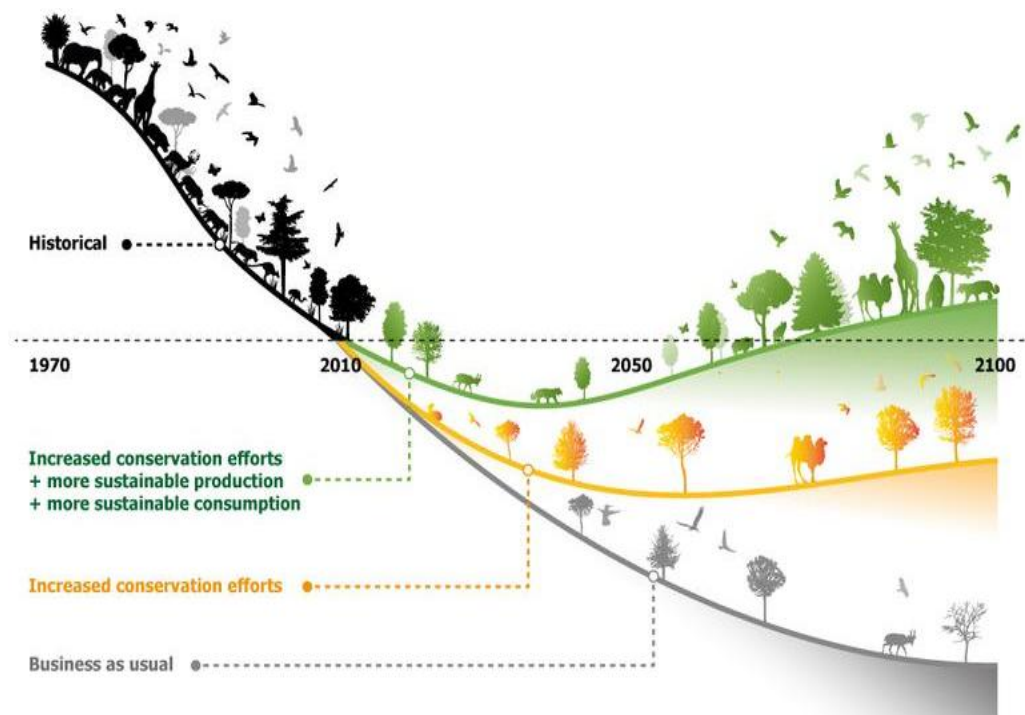


Allan et al., Ecology 2016
La Provost et al. Nature Ecol Evol. 2022

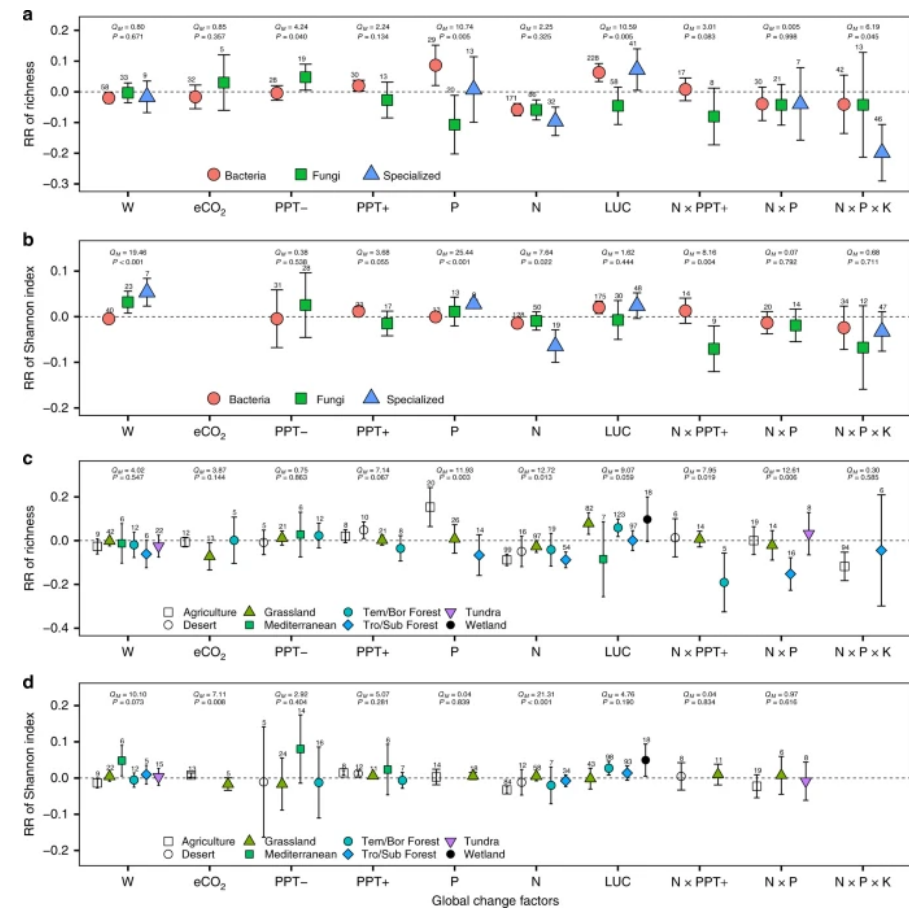


Bender et al., New Phytol., 2022

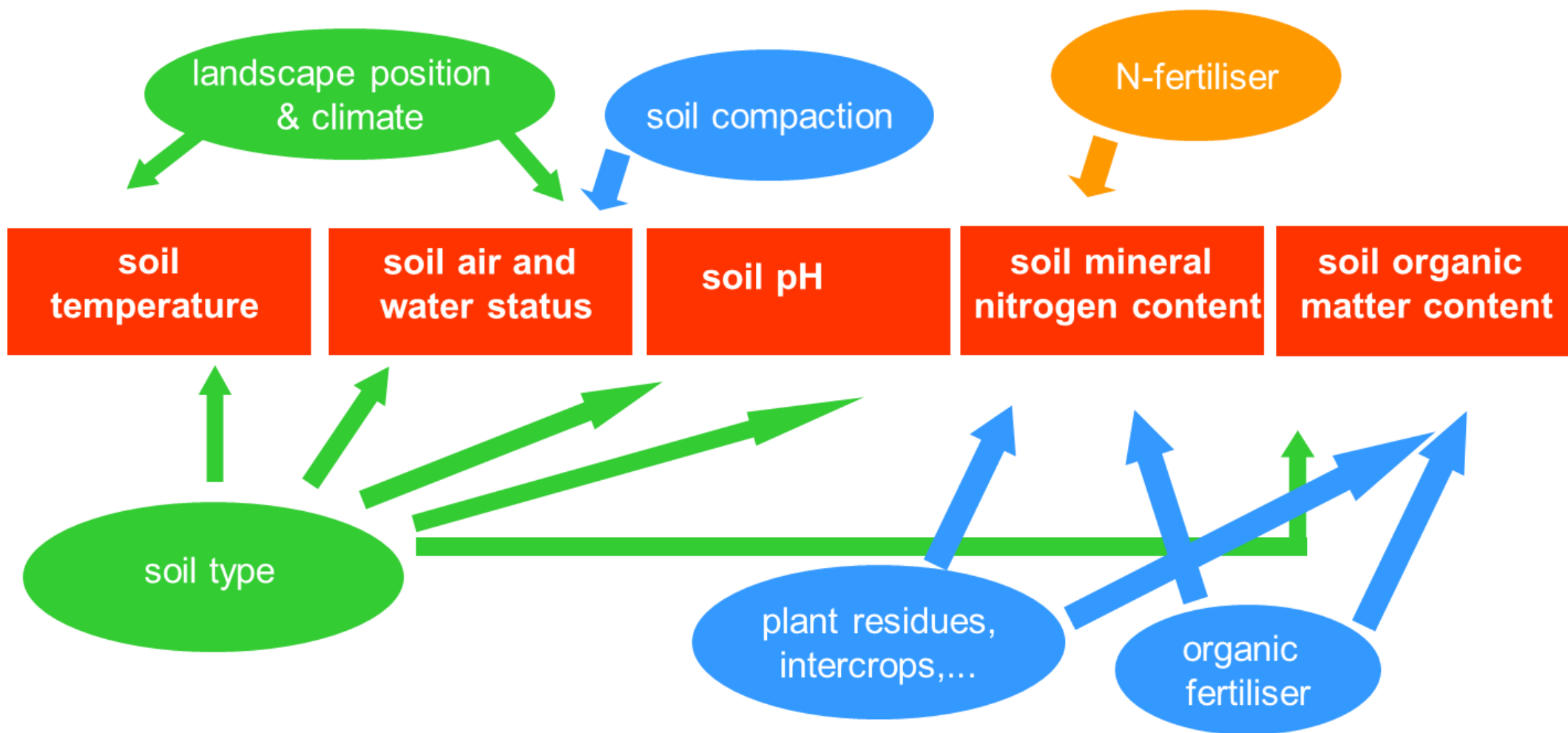
Verlust an Bodendiversität



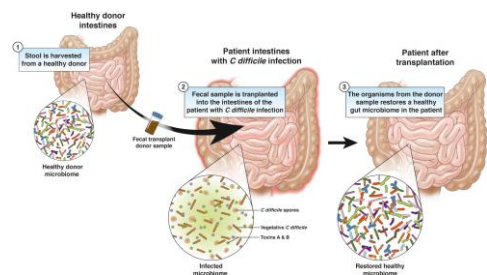
Source: World Wide Fund for Nature, 2005



Soliveres et al., Phil. Trans. R Soc. B. 2016
Soliveres et al., Nature 2016



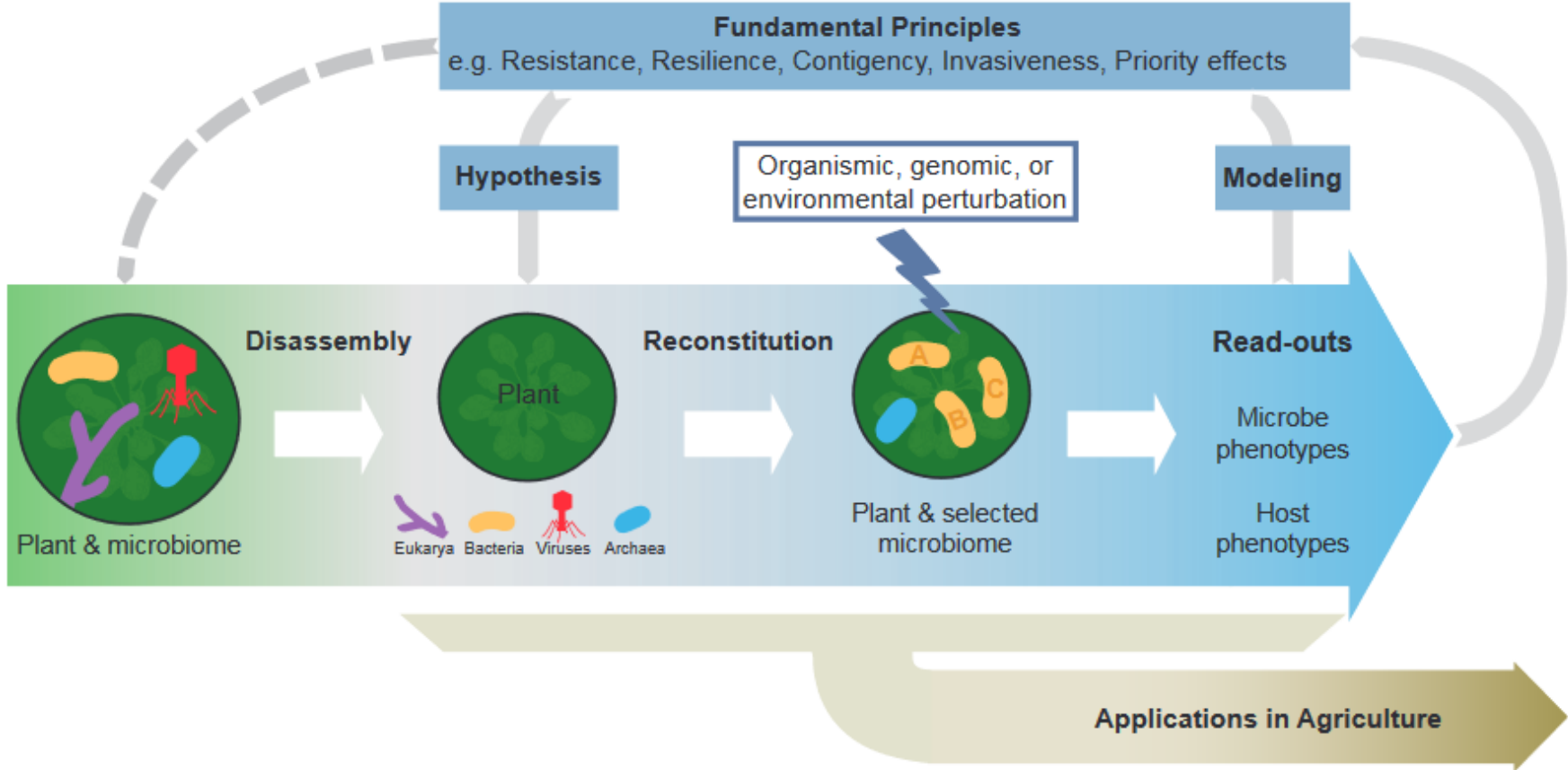
Bodentransplantation



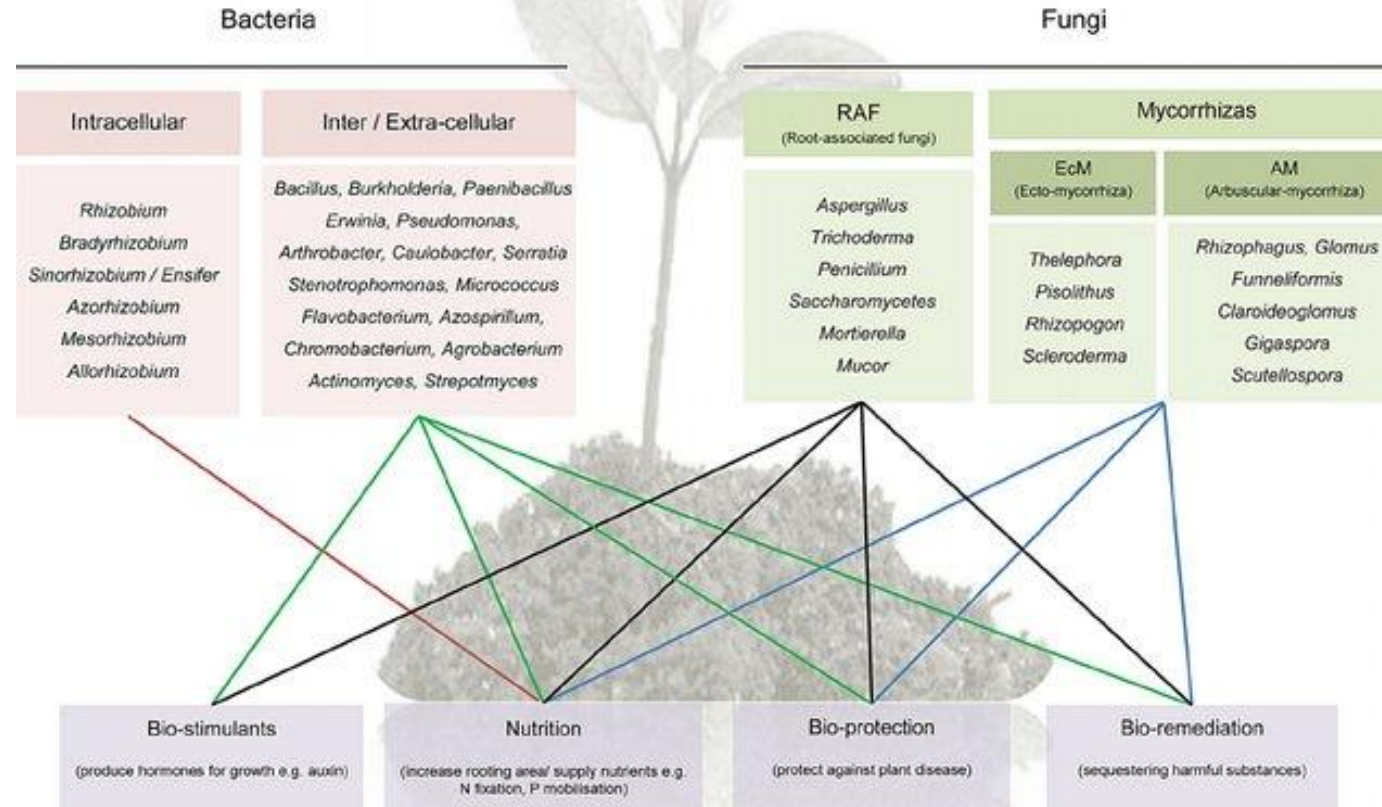
<https://microbeonline.com/fecal-transplant-principle-procedure-uses-risks/>



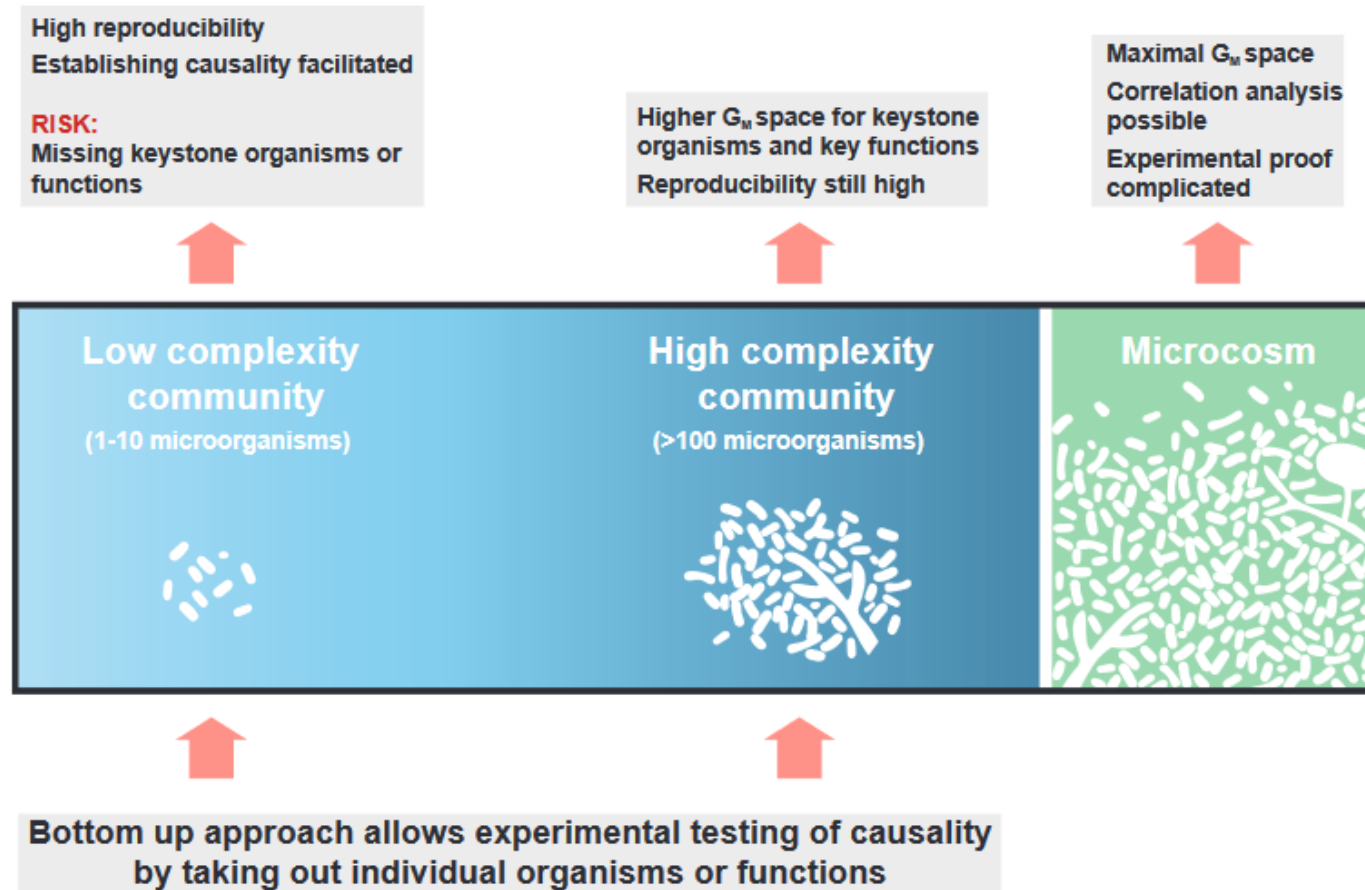
Selektion von Probiotika...



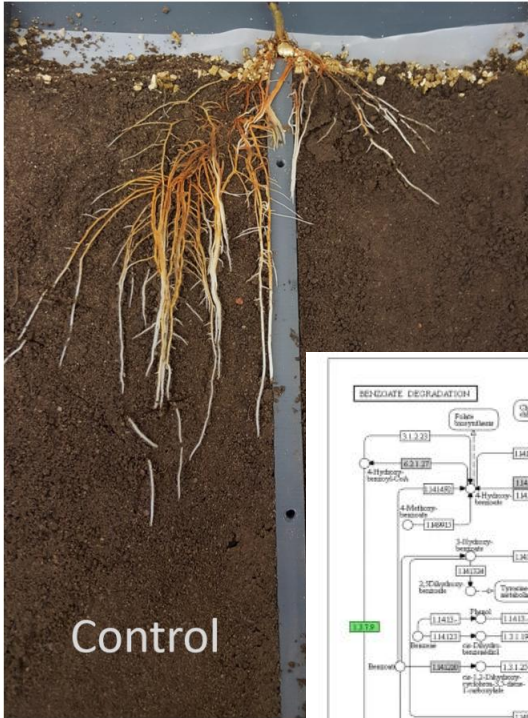
Plant growth-promoting microorganisms (PGPM)



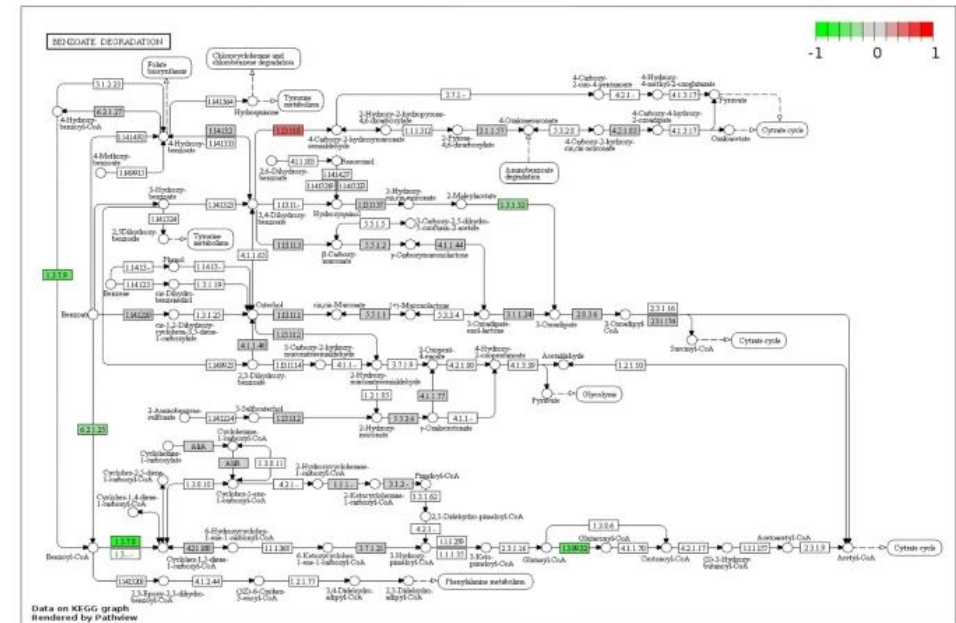
Radl et al. Microbiome 2020
 Young et al. Fron Microbiol 2020
 Fischer at al. Front. Microbiol. 2013
 Uksa et al., Appl. Env. Microbiol. 2015
 Uksa et al. Front. Microbiol. 2015
 Uksa et al. Microbial Ecol. 2017
 Young et al. sub.
 Vestergaard et al. sub.
 Zadel et al., Env. Poll. 2022
 Mohamad et al. Env. Microbiome, 2025



Hernandez et al., Cell, 2026
Sessitsch et al., sub.



Metagenomics reconstruction of phenyl degrading pathways

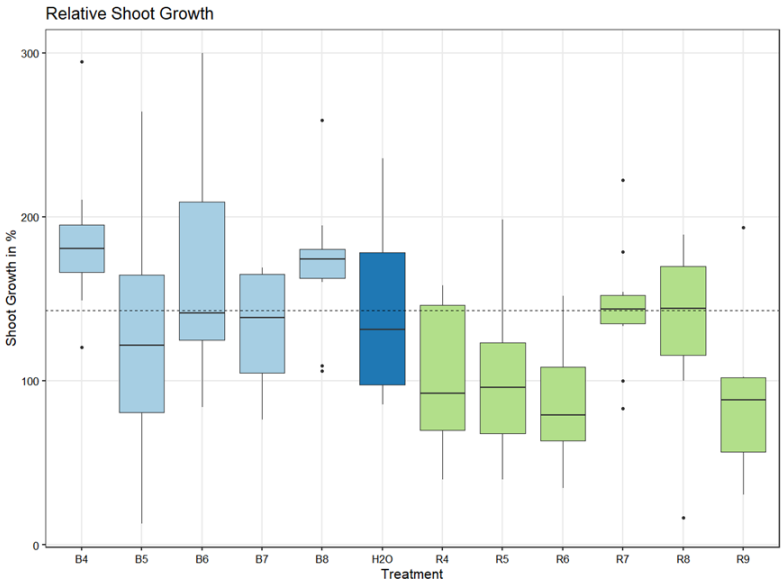


Multifunctional Bioinoculum (Rhodococcus, Bacillus, AMF)

Genomic reconstruction of isolated Rhodococcus strains



Plant growth promoting bioassay



Radl et al. Microbiome 2020
Benning et al. Arch. Microb. 2022
Mahnkopf et al. Front. Microb. 2022
Mahnkopf et al. Host – Mic. Inter. 2021

Praebiotika



Huminsäuren / Fulvinsäuren

Indol-3-Essigsäure (IAA)
Gibberelline / Cytokinine

Siderophore – Eisenchelatoren Organische

Säuren (Milchsäure, Zitronensäure,
Gluconsäure)

Peptide/Enzyme (z. B. Phytase, Proteasen)
Polysaccharide

Biosurfaktanten (Rhamnolipide, Surfactine)

Kurzkettige Fettsäuren (Acetat, Butyrat,
Propionat)

VOC (flüchtige organische Verbindungen)
Aminosäurehydrolysate

Probiotika

Vorteile

- **Fügen aktive Mikroorganismen direkt hinzu**, die Funktionen im Boden übernehmen.
- Können **Nährstoffe mobilisieren** (Phosphor, Stickstoff, Mikronährstoffe).
- **Verbessern Wurzelwachstum** (z. B. durch Mykorrhiza).
- **Erhöhen Stressresistenz** der Pflanzen (Trockenheit, Salz, Krankheiten).
- Können **Pflanzenkrankheiten reduzieren**, indem sie pathogene Organismen verdrängen.
- Manchmal **schnelle Effekte**, besonders bei Mykorrhiza.

Nachteile

- **Sehr empfindlich** gegenüber Lagerung, Temperatur, Trockenheit.
- Müssen im Boden **überleben und sich etablieren**, was nicht immer gelingt.
- **Nicht jeder Mikroorganismus harmoniert mit jedem Boden** (pH, Struktur, organischer Gehalt).
- Manche Kulturen (z. B. EM) wirken **stark standortabhängig**.
- **Kurzfristige Wirkung**, wenn keine Nahrung (organische Substanz) verfügbar ist.
- **Teurer** als rein organische Verbesserer.

Präbiotika

Vorteile

- 1. Sehr stabil & lagerfähig**
Keine lebenden Organismen → hitzestabiler, oxidationsresistenter, gut dosierbar.
- 2. Unabhängig von Bodenbedingungen**
- 3. Sofort verfügbar und schnell wirksam**
Metabolite wirken direkt, ohne dass Mikroben erst wachsen müssen.
- 4. Keine Gefahr der Inkompatibilität**
Es besteht kein Risiko, fremde Mikroorganismen einzuschleusen.
- 5. Aktivieren die native Bodenmikrobiologie**
Stimulieren Mikrobenaktivität, Enzymproduktion und Nährstoffkreisläufe.
- 6. Können hochspezifische Effekte haben**
 - Siderophore → bessere Eisenverfügbarkeit
 - Indol-3-Essigsäure → Wurzelwachstum
 - Exopolysaccharide → Bodenaggregation
 - Biosurfaktanten → Löslichkeit hydrophober Nährstoffe
- 7. Sehr gute Kombination mit probiotischen Inokulaten**
Sie dienen als Nahrung oder Booster für hinzugefügte Mikroben.

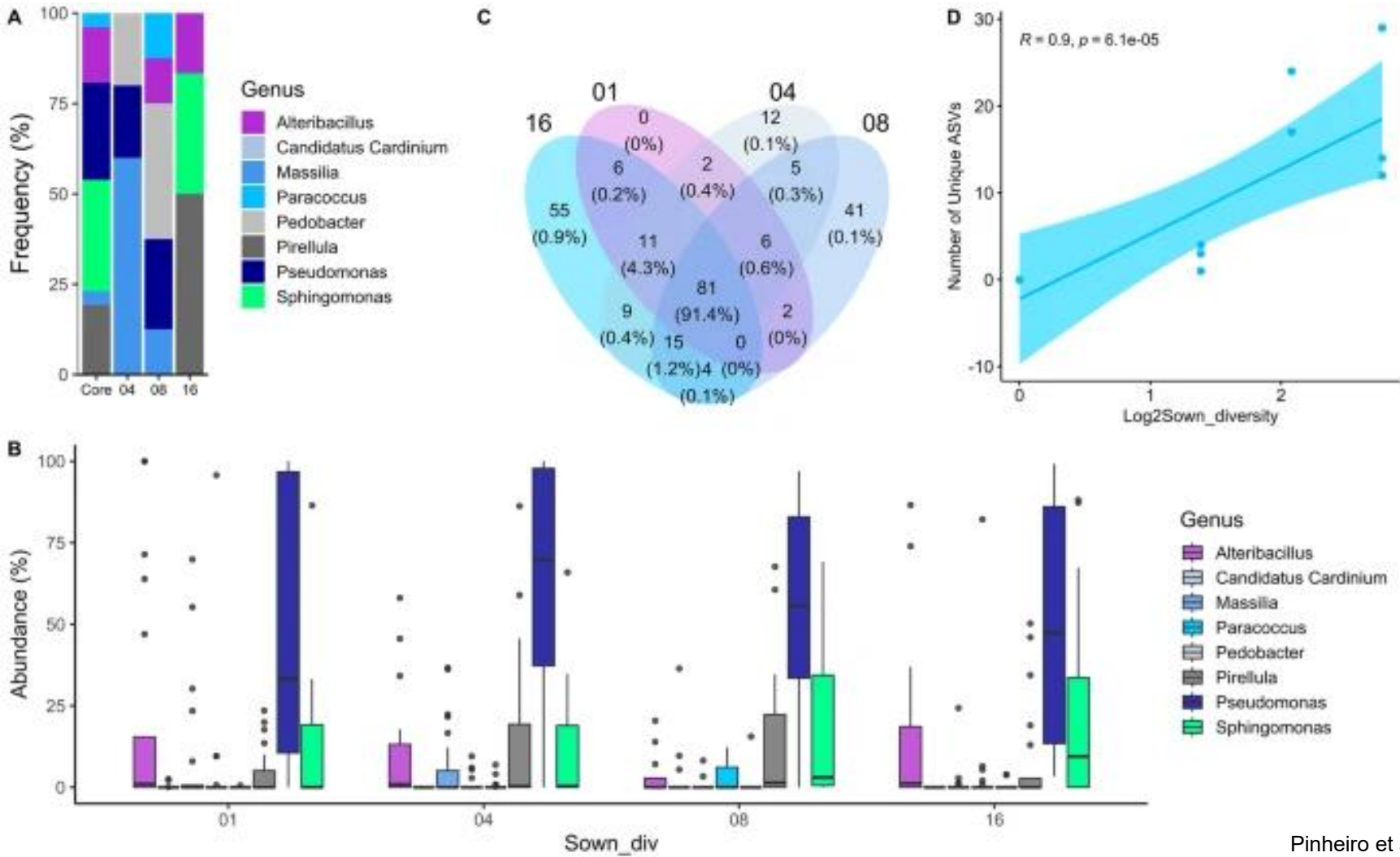
Nachteile

- 1. Wirken nicht selbstständig mikrobiell vermehrend**
- 2. Teilweise kostspielig in der Herstellung**
- 3. Risiko einer falschen Dosierung**
Zu konzentriert:
 - Hemmung des Pflanzenwachstums
 - Hemmung der Bodenmikrobiologie
- 5. Kein Ersatz für strukturelle Bodenverbesserung**
- 6. Abbaubarkeit**
Viele Metabolite werden schnell zersetzt → wiederholte Anwendung nötig.



Was heisst das nun für Golfplätze ?



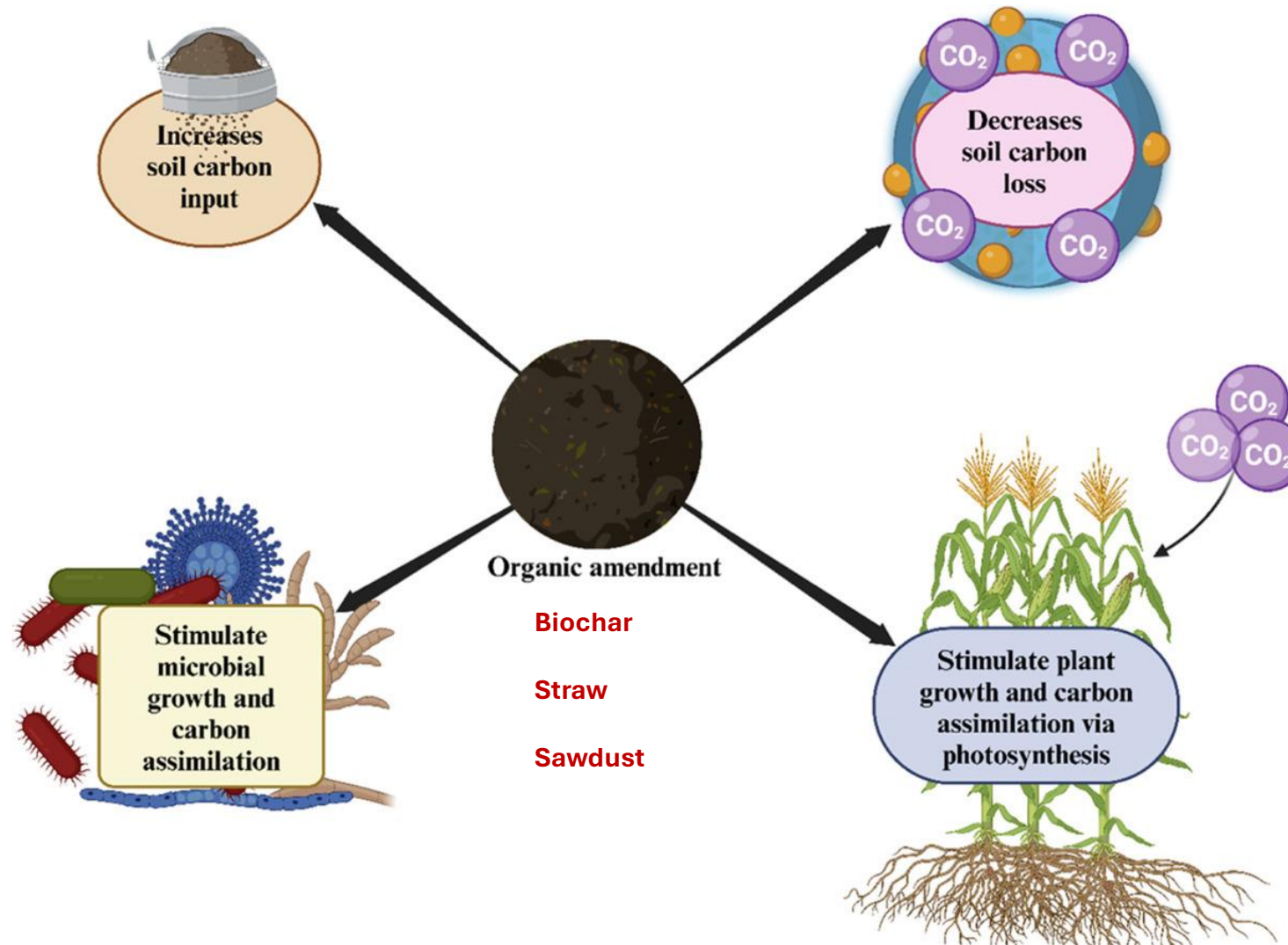


Pinheiro et al., Env. Microbiome, 2024

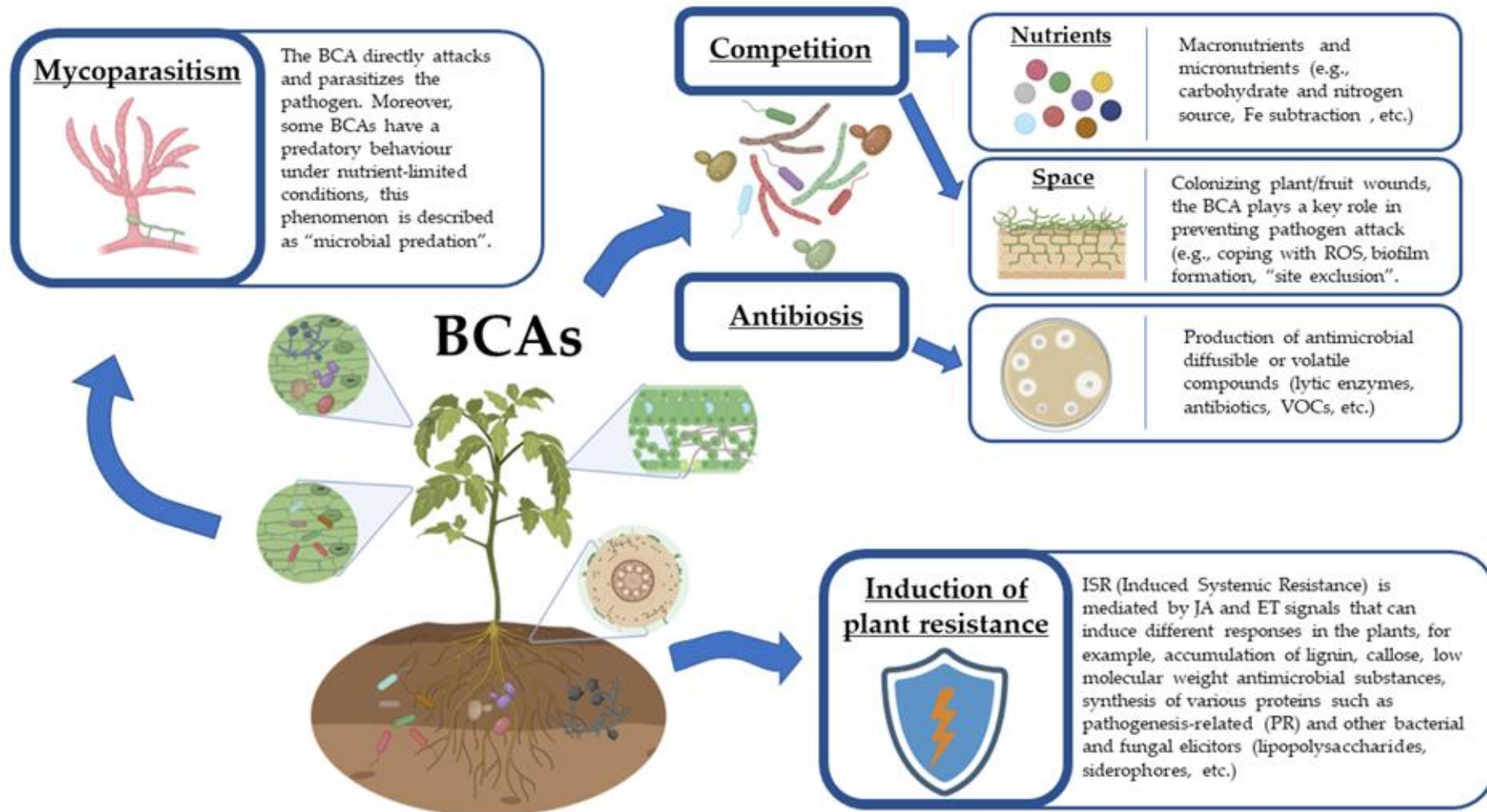
Kohlenstoffreiche Verbindungen

Stoichiometrie

C:N:P konstant
70:6:1



Biostimulation gegen biotische Stressoren



Fusarium Patch

Pathogen: *Microdochium nivale*

Antagonistische Bakterien & Pilze

Trichoderma harzianum – parasitiert Hyphen von *M. nivale* und konkurriert aggressiv um Nährstoffe.

Trichoderma atroviride – produziert antifungale Metabolite, die gegen *Microdochium* wirksam sind.

Bacillus subtilis – produziert Antibiotika (Surfactin, Iturin), die das Wachstum von *Microdochium* unterdrücken.

Bacillus amyloliquefaciens – starker Wurzeloberflächenbesiedler; induziert pflanzeigene Abwehrmechanismen.

Pseudomonas fluorescens – produziert Siderophore und antifungale Substanzen, die *Microdochium* hemmen.

2. Anthraknose

Pathogen: *Colletotrichum cereale*

Antagonistische Bakterien & Pilze

Trichoderma harzianum – Hyperparasit und starker Konkurrent in Filz- und Bodenumgebungen.

Trichoderma virens – setzt Gliotoxin und andere gegen *Colletotrichum* aktive Metabolite frei.

Bacillus subtilis* / *Bacillus amyloliquefaciens – gut dokumentierte Hemmung von *Colletotrichum*-Arten durch Lipopeptide.

Pseudomonas chlororaphis – produziert Phenazin-Verbindungen, die für Anthraknose-Pilze toxisch sind.

Streptomyces lydicus – antagonistisch wirkender Aktinomyzeta, der Wurzeln besiedelt und *Colletotrichum* unterdrückt.

3. Dollar Spot

Pathogen: *Clarireedia jacksonii* (früher *Sclerotinia homoeocarpa*)

Antagonistische Bakterien & Pilze

Trichoderma harzianum – dokumentierte Unterdrückung von Dollar Spot durch Parasitismus.

Trichoderma koningiopsis – starker Hemmer von *Clarireedia*-Arten in vitro.

Bacillus velezensis – produziert antifungale Lipopeptide, die gegen Dollar-Spot-Pilze wirksam sind.

Pseudomonas fluorescens – reduziert Dollar Spot über Eisenkonkurrenz und antifungale Metabolite.

Streptomyces griseoviridis – produziert antifungale Antibiotika, die Dollar-Spot-Erreger hemmen.

4. Take-all Patch

Pathogen: *Gaeumannomyces graminis* var. *avenae/tritici*

Antagonistische Bakterien & Pilze

Pseudomonas fluorescens (2,4-DAPG-produzierende Stämme) – der am besten untersuchte Unterdrücker von Take-all; Schlüsselorganismus im Phänomen „Take-all decline“.

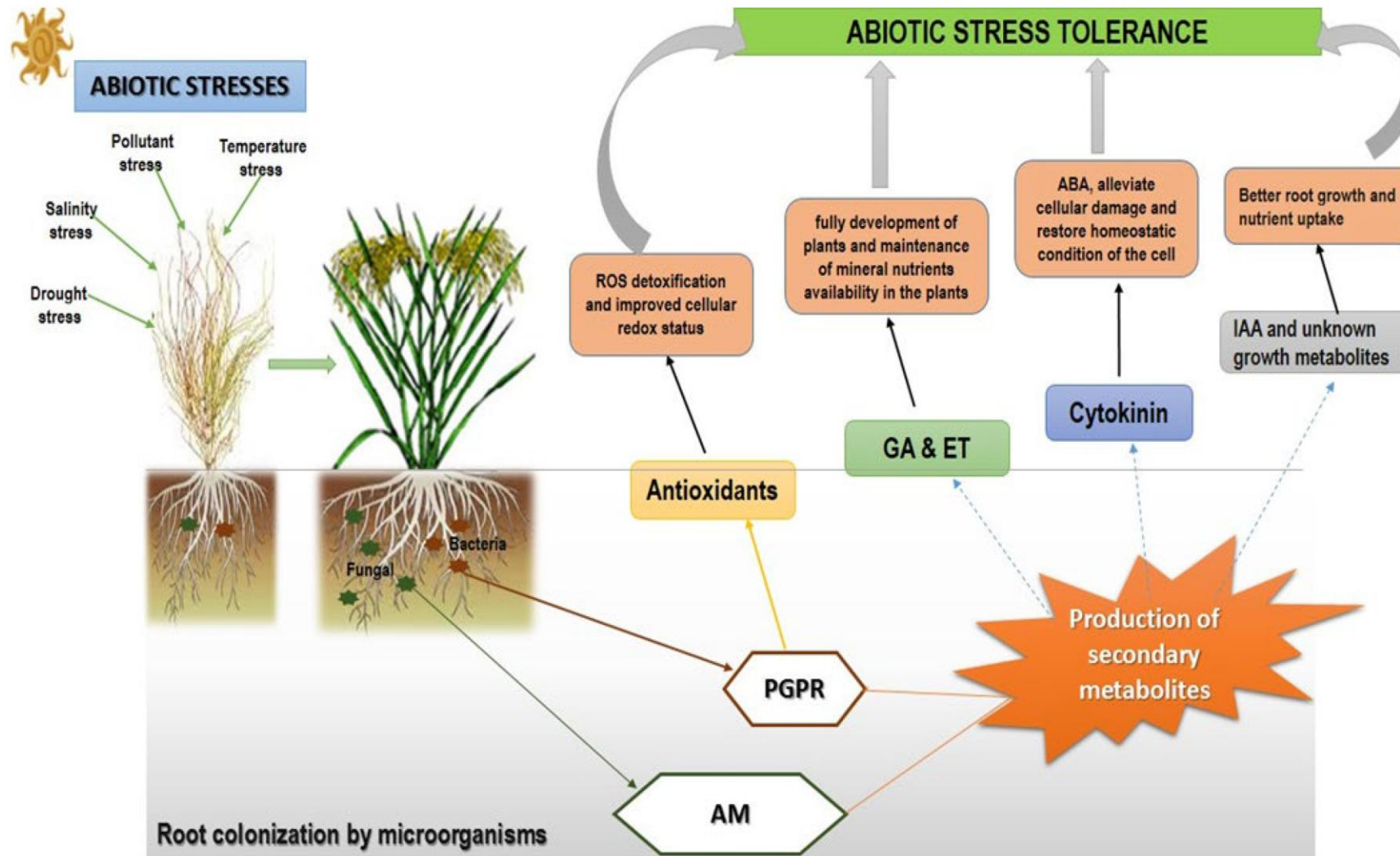
Trichoderma harzianum – konkurriert um Infektionsstellen an den Wurzeln und kann Hyphen von *Gaeumannomyces* parasitieren.

Trichoderma asperellum – induziert Resistenz in Rasengraswurzeln und unterdrückt die Wurzelfäule durch *Gaeumannomyces*.

Bacillus amyloliquefaciens – vermindert die Wurzelbesiedlung durch den Take-all-Erreger.

Streptomyces spp. – insbesondere *S. lydicus* und *S. griseus*, die antifungale Metabolite gegen *Gaeumannomyces* produzieren.

Biostimulation gegen abiotische Stressoren



Biostimulationen gegen abiotische Stressoren

1. *Bacillus subtilis*

Mechanismen

Produziert Exopolysaccharide (EPS) → verbessert die Wasserspeicherung im Boden.

Induziert systemische Toleranz der Pflanze (IST) durch antioxidative Mechanismen.

Fördert das Wurzelwachstum und erhöht die Bildung von Wurzelhaaren.

Produziert Trockenstress-Toleranzhormone (z. B. Abszisinsäure-ähnliche Verbindungen).

2. *Bacillus amyloliquefaciens* / *Bacillus velezensis*

Mechanismen

Produziert Lipopeptide und EPS, die die Wasserverfügbarkeit in der Rhizosphäre verbessern.

Stimuliert die Anreicherung von Osmolyten (Prolin, Glycin-Betain) in Pflanzen.

Verbessert die Wurzelarchitektur und erhöht die Nährstoffaufnahme unter trockenen Bedingungen.

3. *Pseudomonas fluorescens*

Mechanismen

Produziert ACC-Deaminase, die Ethylen abbaut – ein Hormon, das normalerweise das Wachstum unter Trockenstress hemmt.

Besiedelt die Wurzeloberflächen und bildet Biofilme, die Feuchtigkeit zurückhalten.

Verstärkt antioxidative Enzyme, die Pflanzenzellen vor Trockenstress schützen.

4. *Pseudomonas putida*

Mechanismen

Starke ACC-Deaminase-Aktivität.

Verbessert die Regulation der Spaltöffnungen (Stomata) durch Metabolit-Signale.

Fördert die Verzweigung des Wurzelsystems, wodurch Pflanzen tieferes Wasser erreichen können.

5. *Azospirillum brasilense*

Mechanismen

Produziert Auxine, die tiefere und faserigere Wurzeln fördern.

Verbessert die Wassernutzungseffizienz durch Veränderung des Pflanzenhormon-Gleichgewichts.

Unterstützt osmotische Anpassung unter Trockenstress.

6. *Trichoderma harzianum*

Mechanismen

Erhöht die Wurzelbiomasse und -tiefe (sehr gut für Rasenflächen).

Verstärkt die pflanzliche Produktion von Antioxidantien und Osmoprotektanten.

Stimuliert die Expression von Trockenstress-Genen.

Verbessert die Stabilität der Bodenaggregate, wodurch Wasser besser eindringen und gespeichert werden kann.

7. *Trichoderma asperellum*

Mechanismen

Induziert systemische Toleranz durch Aktivierung trockenstress-relevanter Enzyme.

Erhöht die Effizienz der Wasseraufnahme, indem die hydraulische Leitfähigkeit der Wurzeln verbessert wird.

Produziert Metabolite, die die Regulation der Spaltöffnungen (Stomata) während Wasserstress beeinflussen.



Fragen ?