



Den agronomiske betydning af forholdet mellem svampe og bakterier i landbrugsjord

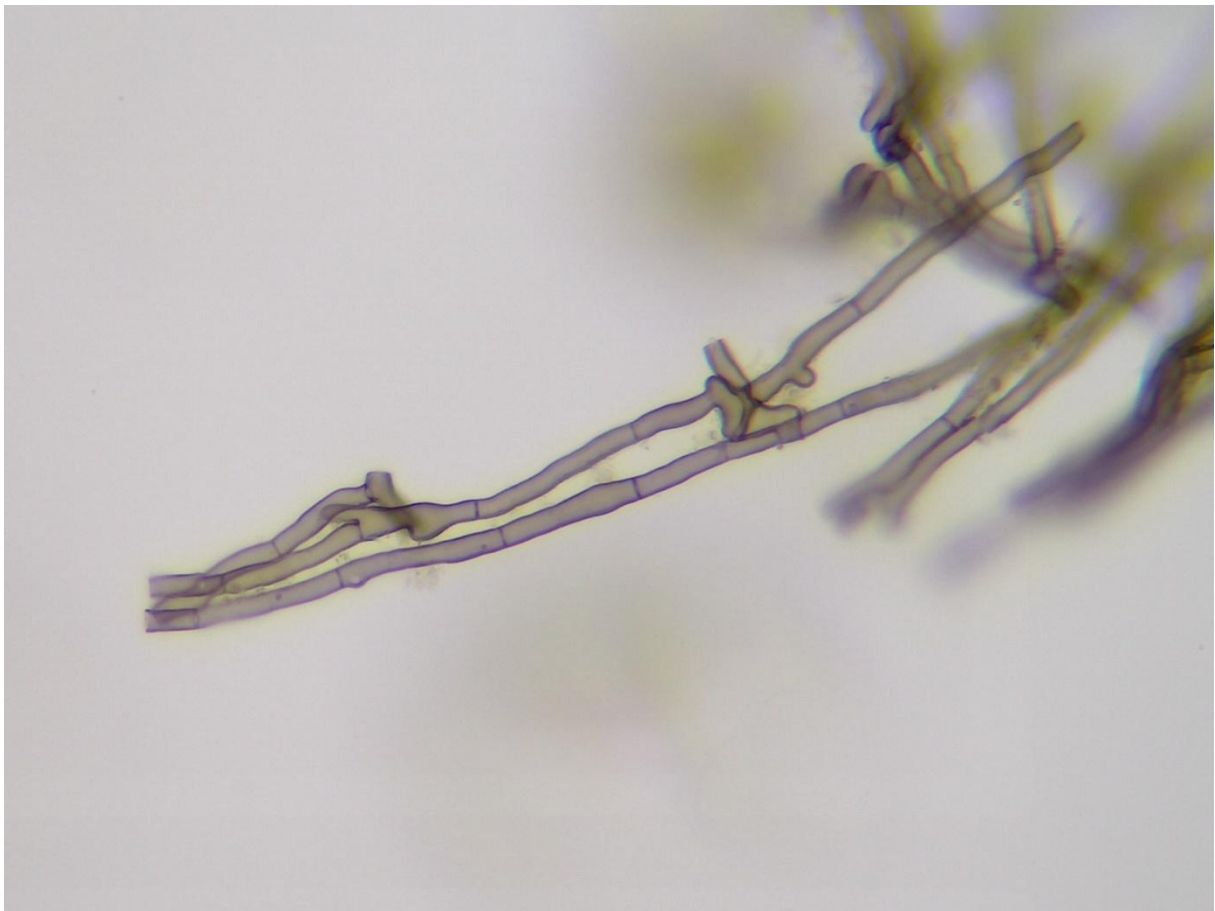


Foto 1 – Svampehyfer og bakterier i mikroskop. Fotograf: Dennis Weigelt Pedersen

Kontakt
Jon Aagaard Enni
jone@icoel.dk , 20270837

STØTTET AF

Promilleafgiftsfonden for landbrug



Sammendrag

Dette notat undersøger, hvilken agronomisk betydning forholdet mellem svampe og bakterier har. Der gives en kort introduktion til emnet med eksempler på, at svampe-bakterieforholdet i visse kredse fremhæves som afgørende for jordens sundhed og frugtbarhed. Herefter foretages en ikke-systematisk litteraturgennemgang, som belyser emnets kompleksitet og faldgruber.

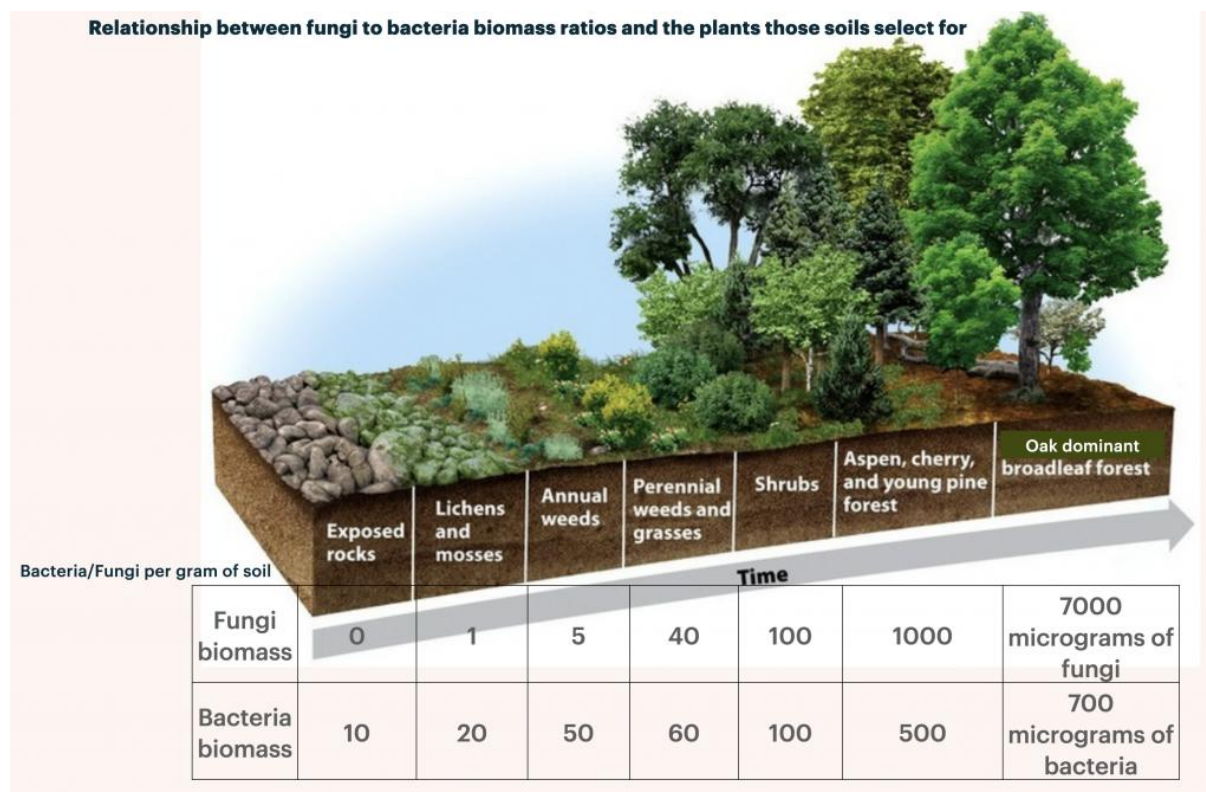
Det konkluderes, at der ikke er meget, der tyder på, at forholdet mellem svampe og bakterier (FBR) i jord er særlig vigtigt *i sig selv*. Der ses en kæmpe variation i FBR-værdier, afhængigt af opgørelsesmetode. Også inden for samme opgørelsesmetode ses store usikkerheder, og navnlig når forholdet opgøres vha. direkte mikroskopi. Ideen om, at svampe er "bedre" end bakterier for plantevækst og jordbundsforhold, er heller ikke entydigt underbygget. I landbrugsjord tyder de mest robuste studier på, at den samlede mikrobielle biomasse er vigtigere end FBR, og at FBR typisk ligger under 1 i de mest frugtbare jorder.

Dog er der grund til at mene, at landbrugsjord generelt har en lavere forekomst af mikroliv end naturlig jord, ikke mindst for svampe, og mange marker ville sandsynligvis kunne understøtte en mere bæredygtig produktion, hvis forholdene for svampe og andet mikroliv blev forbedret.

Introduktion

Forholdet mellem svampe og bakterier (*Fungal:Bacterial Ratio, (FBR)*) i jord er en parameter, som ofte måles og rapporteres i videnskabelige studier. Betydningen og anvendeligheden af dette forhold er imidlertid omdiskuteret. I visse kredse anses det for at være ekstremt vigtigt at øge antallet af svampe i dyrkningsjord, mens der bredt i de forskningsområder, som beskæftiger sig med dyrkningsjorden og dens mikrobielle samfund, er en del uenighed.

FBR som måleparameter har været brugt til at forklare en række forskellige forhold i jord. Ofte ses FBR angivet som stigende i naturlig plantesuccession fra bar jord over græsarealer til krat og skov:



Figur 1 Kilde: <https://soilkind.co.uk/>



Denne form for fremstilling benyttes ofte til at fremsætte normative påstande om stigende jordsundhed/-frugtbarhed/-kvalitet som effekt af successionen, og ledsages normalt af en opfordring til aktivt at øge FBR i landbrugsjord, for at opnå en række dyrknings- og miljømæssige fordele, såsom øget plantevækst og resiliens, lavere sygdoms- og skadedyrstryk, samt lavere behov for import af næringsstoffer mm.

FBR's øgede popularitet som emne i løbet af de seneste årtier skyldes ikke mindst den amerikanske forsker, Elaine Ingham, og hendes "Soil Food Web School", som hyppigt fremfører denne form for påstande. Deres hovedbudskab er, at størstedelen af verdens dyrkningsjord er domineret af bakterier, og at det vigtigste fokuspunkt for jordforbedring globalt er at hæve FBR til minimum 1. Ingham hævder sågar, at hvis FBR hæves tilstrækkeligt, kan gødskning helt undlades – uden udbyttedgang¹. Soil Food Web School tilbyder kurser i mikroskopi, bl.a. med henblik på at kvantificere FBR i dyrkningsjord, og i specifikke metoder til fremstilling af kompost, som markedsføres som BioComplete™ Compost.

DAVID C. JOHNSON

En anden fortæller for ideen om FBR som afgørende for jordsundhed er molekylærbiologen David C. Johnson. Johnson har sammen med sin hustru udviklet en metode til fremstilling af svampedomineret kompost, kaldet "The Johnson-Su Composting Bioreactor" ([Johnson-Su-Bioreactor.pdf](#)). Johnson har foretaget forsøg med sin kompost i New Mexicos ørken, og mener at kunne påvise, at bl.a. kulstofopbygning i jorden stiger med stigende FBR (Johnson et al., 2015).

Der findes umiddelbart kun én videnskabelig artikel, som har Johnson som hovedforfatter, og selvom den er fra 2015, er den stadig i skrivende stund (ultimo 2024) i pre-print ved forlaget, hvilket vil sige, at den ikke er fagfællebedømt. Det hænger formentlig sammen med, at artiklen indeholder adskillige metodiske greb, som er kontroversielle. Før det første er der intet decideret kontrolleret i forsøgene.

Johnson et al. (2015) sammenligner effekten på jorden af et dyrningssystem (*Biologically Enhanced Agricultural Management, BEAM*) med kontinuerlig dyrkning og nedmuldning af grøngødning og tildeling af "Johnson-Su-kompost" med konventionel, monokulturel dyrkning af majs. Desuden er der stor forskel i jordbearbejdningens intensitet mellem behandling og kontrol, og dermed er den eneste egentlige konstante parameter i forsøget jordbunden. Der fremsættes påstande om betydningen af FBR, men der føres ikke egentlig bevis for disse påstande, og fordi måden, FBR reguleres på, er stigende tildeling af kompost, er der næsten 100% korrelation mellem jordens kulstofindhold og FBR i forsøgsparcellerne ($R^2 = 0,99$). Det betyder, at det ikke er til at vide, om FBR eller andre aspekter ved øget kulstofindhold i jorden giver de rapporterede effekter.

Svampes rolle i markens økosystem

Det er svært at overvurdere vigtigheden af svampes aktivitet i jord. Svampe spiller centrale roller i utallige økosystemprocesser, såsom:

- Pedogenese (jorddannelse) gennem bioforvitring af stenarter (forældrematerialet)
- Omsætning af organisk materiale
- Transport af vand og næringsstoffer
- Patogenese (forekomst af sygdomme)
- Regulering af fysiske jordbundsforhold, f.eks. struktur, luftskifte, pH og vandtilgængelighed

¹ Se f.eks. "Panel with Dr Elaine Ingham & John Kempf" (2021)
<https://www.youtube.com/watch?v=FEHnvwS9Inc>



- Kulstofopbygning
- Bioremediering af tungmetaller og andre forurenende stoffer
- Inter- og intraspecifik signalering (kommunikation inden for og imellem arter)

(Gadd (2006))

Bakteriers rolle i markens økosystem

Lige som svampe er bakterier uundværlige i jordens mikrobiom, hvor de tjener mange af de samme økosystemfunktioner som svampe, og en række funktioner, som er bakteriespecifikke. Bakterier spiller en afgørende rolle i f.eks.:

- Pedogenese (jorddannelse) gennem bioforvitring af stenarter (forældrematerialet)
- Omsætning af organisk materiale
- Kvælstoffiksering
- Mineralisering af næringsstoffer
- Mobilisering af næringsstoffer (opløsning af fosfor, chelatering af metaller)
- Patogenese (forekomst af sygdomme)
- Undertrykkelse af patogener
- Regulering af fysiske jordbundsforhold, f.eks. struktur, luftskifte, pH og vandtilgængelighed
- Kulstofopbygning
- Nedbrydning af forurenende stoffer (organiske toksiner, pesticider og lignende)
- Inter- og intraspecifik signalering (kommunikation inden for og imellem arter)

(Sharma & Bhakri, 2019)

Metodiske udfordringer og begrænsninger

Spørgsmålet om vigtigheden af FBR lader sig ikke umiddelbart besvare enkelt og entydigt. Det er ikke mindst fordi, der er store metodiske udfordringer forbundet med måling, kvantificering og ekstrapolering af bakteriers og svampes biomasse. Her følger udvalgte eksempler på disse udfordringer.

Målemetoder

Wang et al. (2019) foretog et stort metastudie med titlen "Fungi to bacteria ratio: Historical misinterpretations and potential implications", som er den mest udtømmende kilde, hvad angår FBR, som er anvendt i nærværende notat. I studiet estimerede de bl.a. biomasseforhold mellem svampe og bakterier i datasæt fra 192 tidligere publicerede studier, og fandt, at værdier for FBR varierer helt enormt, afhængigt af, hvilken metode der var valgt til bestemmelse af de to mikrobielle gruppers forekomst. Figuren herunder illustrerer problematikken.

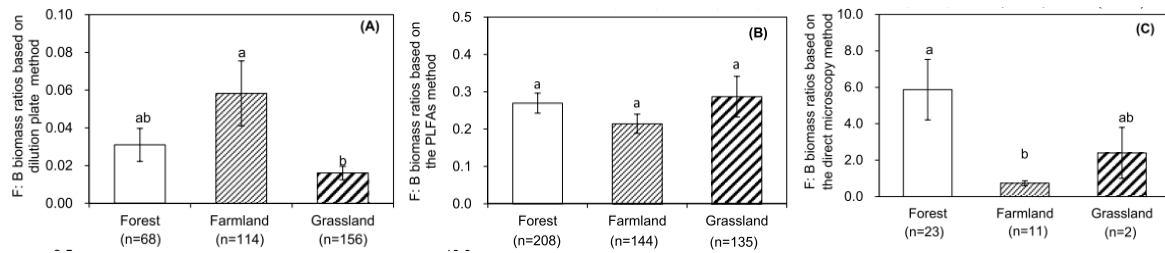


Fig. 1. Soil fungi to bacteria ratios in different ecosystems: (A) The data of forest, grassland and farmland from Appendix S1 based on the method of dilution plate culture; (B) The data of forest, grassland and farmland from Appendix S2 based on the method of PLFAs (Phospholipid fatty acids); (C) The data of forest, grassland and farmland from Appendix S3 based on the method of direct microscopy.

Her følger en kort gennemgang af de mest anvendte metoder til bestemmelse af forekomsten af svampe og bakterier.

MIKROSKOPI

Der findes mange forskellige teknikker til bestemmes af mikrobiel biomasse ved direkte mikroskopering af jord. Fælles for dem alle er, at en kendt mængde jord i opløsning placeres mellem to glasplader med et kendt areal. Normalt bruges særlige farvestoffer (stains) til indfarvning af grupper af mikroorganismer, som derved bliver lettere at se og tælle op.

Lysmikroskopet (bright field microscope) er den ældste og mest enkle type. Herudover findes såkaldte fasekontrast-mikroskoper, som omdanner faseforskydninger i det lys, der passerer gennem transparente celler, til forskelle i lysstyrke. Det gør det muligt at se cellestrukturer, som ikke er synlige med alm. lysmikroskopi uden brug af (tidskrævende) indfarvning. Se nedenstående foto for en sammenligning af lysmikroskopi (venstre) med fasekontrastmikroskopi (højre):

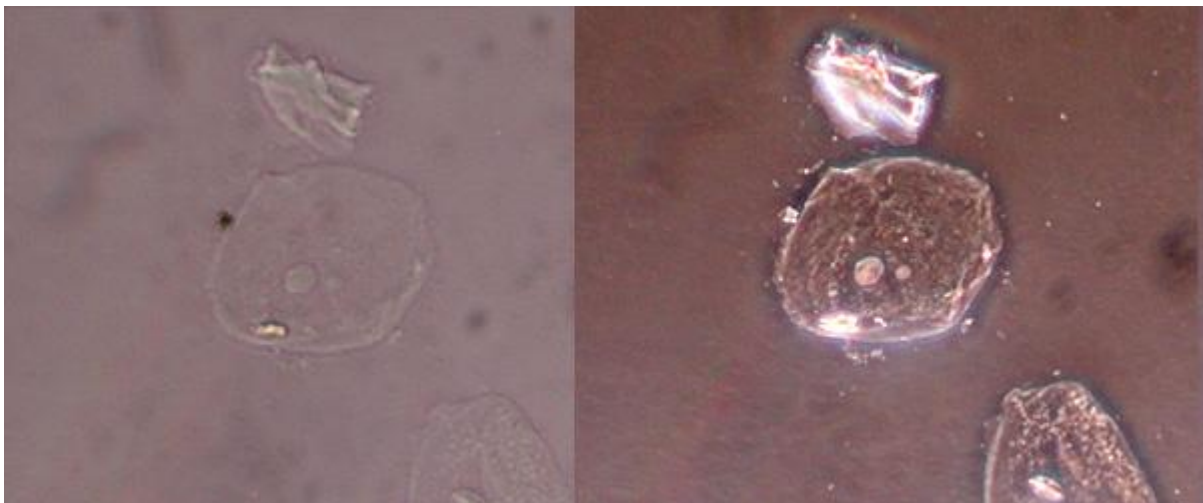


Foto 2 - Billedkilde: Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Phase-contrast_microscopy#/media/File:Bright-field_phase_contrast_cell_image.jpg

Udover de to nævnte mikroskoptyper findes mere avancerede typer, såsom fluorescensmikroskoper, som benytter UV-lys og forskellige fluorescerende forbindelser til at få mikroorganismer til at "lyse op" i fluorescerende farver på en mørk baggrund. Se nedenstående foto for eksempel:

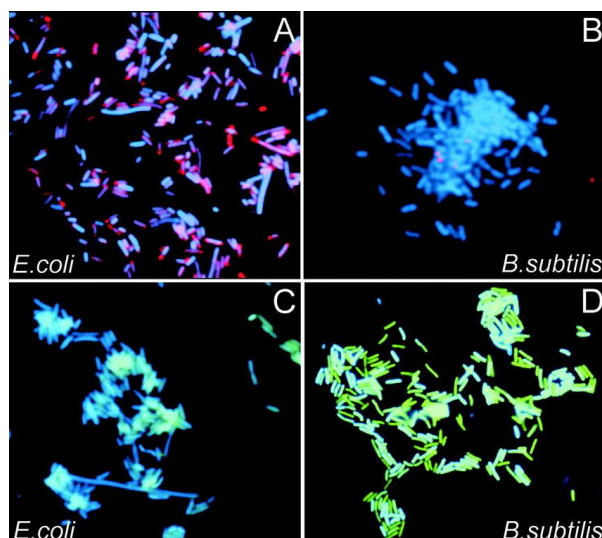


Foto 3 - Bakterier observeret ved fluorescensmikroskopi. Kilde: Smolina et al. (2007).
<https://doi.org/10.1128/AEM.02038-06>

Direkte mikroskopi er ifølge flere kilder (Wang et al., 2019) den metode til bestemmelse af FBR, som resulterer i de højeste FBR-værdier. I andre studier er mikroskopi omvendt den metode, som producerer de laveste værdier for svampes biomasse (Joergensen & Wichern, 2008). Det kan hænge sammen med 1) at et ukendt antal mikrober ekskluderes i tællinger som døde, selvom de er levende, men "i hi", 2) at det er vanskeligt at skelne mellem levende og døde svampe, og 3) at omregning af svampenes målte areal til først rumfang og siden tørstofvægt er behæftet med stor usikkerhed (Ibid.).

Innovationscenter for Økologisk Landbrug har i 2025 foretaget en undersøgelse², hvor forskellige analysemetoder til bestemmelse af mikrobielle forhold i landbrugsjord blev sammenlignet. Det foregik ved, at delprøver af større jordprøver blev sendt til forskellige analyseudbydere, hvor de blev analyseret med forskellige metoder. Jordprøverne blev udsat for bl.a. PLFA-analyse, DNA metabarcoding og Soil Food Web-mikroskopi. Der blev udført mikroskopianalyser af to forskellige Soil Food Web-konsulenter. Overraskende nok gav mikroskopieresultaterne meget lavere FBR-værdier end PLFA-resultaterne, og derudover var FBR i gennemsnit 10 gange så høj i analyserne fra den ene Soil Food Web-konsulent, som i analyserne fra den anden.

SELEKTIV RESPIRATORISK INHIBITION

Denne metode har til formål at kvantificere hhv. svampes og bakteriers andel af den samlede respiration af CO₂ fra omsætningen af tilsat sukker (glukose). Ved hjælp af to selektive antibiotika hæmmes aktiviteten af hhv. svampe og bakterier, og respirationen måles og sættes i forhold til den samlede respiration. Metodens styrke er, at den som den eneste udelukkende kvantificerer levende, aktive organismer. Metoden har dog følgende problemer:

- 1) Svampe og bakterier reagerer forskelligt på tilsætning af glukose. Ifølge Joergensen & Wichern, (2008) er det kun ca. 54% af den mikrobielle biomasse i jord, som kan omsætte glukose, og metoden hviler derfor på en antagelse om, at den ikke-responsive del af mikrobiologien har FBR, som ligner den responsive dels FBR.
- 2) De anvendte antibiotika er ikke 100% selektive, og selektiviteten er dosisafhængig, hvorfor doseringen skal kalibreres for hver jordprøve. Desuden kan adsorption af inhibatoren til

² Find rapporten for undersøgelsen på <https://icoel.dk/om-os/projekter/promilleafgiftsfonden-for-landbrug/2025/markens-motor-mikrobiel-sammensaetning-og-betydning-af-svampebakterie-forhold-i-jorden/>



jordkolloider sænke inhibitionen. Det giver plads til fejlkilder i form af suboptimal dosering af inhibatoren. Der findes en metrik for angivelse af overlappende eller ufuldstændige inhibitions-effekter (inhibitor additivity ratio, (IAR)), men Joergensen & Wichern finder i deres review-artikel (2008), at IAR sjældent beregnes eller angives i forskningen.

SPECIFIKKE CELLEMENBRANKOMPONENTER (PLFA-ANALYSE)

I PLFA-analyse bruges såkaldte fosfolipider som indikatorforbindelser for forskellige organismegrupper. Fosfolipider (eller fosfolipidfedtsyrer, *PhosphoLipid Fatty Acids (PLFA)*) indgår i mikrobers cellemembraner, og visse PLFA'er er specifikke for hhv. svampe, bakterier og andre typer af organismer. Derfor kan mængden af udvalgte PLFA'er bruges til at udlede mængden af bestemte grupper af organismer. PLFA'er er flygtige, dvs. de nedbrydes hurtigt i jorden, når en organisme dør, og PLFA-analyse er derfor mere egnet til at identificere levende organismer, end f.eks. DNA-sekventering er. PLFA-analyse giver dog resultater med en markant lavere taksonomisk detaljegrad end DNA-sekventering. Det vil sige, at PLFA-analyse kun kan fortælle noget om de samlede mængder af overordnede organismegrupper (f.eks. svampe eller bakterier), hvor man med visse DNA-teknikker kan kortlægge alle mikroorganismer i en jordprøve helt til artsniveau.

Bestemmelse af FBR ved brug af PLFA-metoden kræver, at der gøres nogle antagelser som kan bruges til omregning fra PLFA-mængder til biomasser. F.eks. er det nødvendigt at estimere, hvor stor en del PLFA udgør af mikroorganismernes biomasse, for at kunne regne baglæns fra PLFA-målinger. Fordi mikrobiologien i jord er enormt kompleks og heterogen, og der kan være stor variation i forholdet mellem biomasse og PLFA, er man i et eller andet omfang nødt til at antage forholdet mellem PLFA og biomasse i den population, man gerne vil undersøge. Det introducerer bias og medfører potentielt resultater som ikke stemmer overens med resultaterne fra andre anvendte metoder.

SPECIFIKKE CELLEVÆGKOMPONENTER

Såkaldte aminosukre kan også bruges til at bestemme forekomst af bakterier og svampe. Svampes cellevægge indeholder store mængder chitin, som er et polysakkarid, der består af aminosukkeret glucosamin. Et andet aminosukker, som bruges til bestemmelse af bakteriel biomasse, er muraminsyre. Både glucosamin og muraminsyre anses som bedst egnede til at teste andre metoders pålidelighed, snarere end som primær metode til bestemmelse af svampe- og bakteriebiomasse (Joergensen and Wichern, 2008).

Khan et al., 2016, Microbial biomass, fungal and bacterial residues, and their relationships to the soil organic matter C/N/P/S ratios. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.02.019>

Betydningen af fysiske jordbundsforhold for FBR

TEKSTUR

Lauber et al. (2008) undersøgte betydningen af arealanvendelse for jordens mikrobielle sammensætning og balancen mellem svampe og bakterier. Ifølge deres databehandling var den samlede andel af ler og silt én af de to vigtigste determinanter for bakteriesamfundet. Jordens tekstur havde dog ingen forklarende kraft ift. jordens indhold af svampe.

Table 4

Land-use effects on edaphic properties and correlations between microbial communities and edaphic properties

	Land-use	Correlation coefficients	
	Main effect	Bacteria	Fungi
pH	2.2	0.47	0.15
%Silt + clay	8.2	0.42	0.00
%Soil moisture	6.9	0.18	0.00
Bulk density, g cm ⁻³	6.7	0.00	0.00
C:N	6.9	0.16	0.73
C, kg ⁻¹	8.2	0.00	0.07
N, g kg ⁻¹	8.1	0.13	0.39
P, mg kg ⁻¹	7.7	0.33	0.54

Significant effects of land-use on soil properties were determined using the Mann-Whitney *U* test for non-parametric data with land-use as the main factor. The Mann-Whitney *U* test statistic is reported. Pearson correlation coefficients relate the calculated UniFrac community distance between each pair of bacterial and fungal communities to the measured soil properties. Significant land-use effects and correlation coefficients are noted as bold text where $P < 0.05$.

Figur 2 - Kilde: Lauber et al., 2008, The influence of soil properties on the structure of bacterial and fungal communities across land-use types.

VANDMÆTNING OG TØRKE

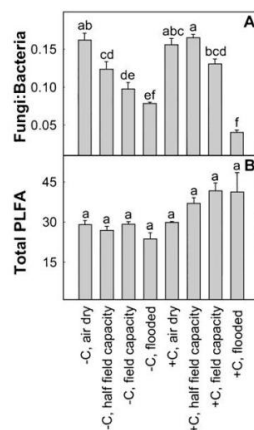


Figure 2. Fungal to bacterial ratio (A) and total nanomoles of PLFA (nmol g⁻¹ DW soil) (B) in each microcosm treatment ($n = 3$, bars are means $\pm$ SE). In (A), letters indicate a significant difference between treatment means following a post hoc Tukey's test ($\alpha = 0.05$). Although there was a significant carbon*water interaction for total nanomoles of PLFA ($P = 0.01$), means were not significantly different following a post hoc Tukey's test.

I et studie, som undersøgte effekten på jordens mikrobiom af vandtilførsel og tilførsel af organisk stof, sås en klar tendens, hvor mere vand, uden tilførsel af organisk stof, sænkede FBR, mens tilførsel af organisk stof mitigerede denne effekt, undtagen ved decideret oversvømmelse (Drenovsky et al., 2004)

Figur 3 - Kilde: Drenovsky et al., 2004, Soil Water Content and Organic Carbon Availability Are Major Determinants of Soil Microbial Community Composition.

Oskonbaeva et al. (2024) undersøgte effekten af udtørring og efterfølgende genvædning af jordprøver på den mikrobielle biomasse og forekomsten af hhv. svampe- og bakteriegener. De fandt, at udtørring og genvædning sænkede den samlede mikrobielle biomasse med 20%, men samtidig, at svampene tålte behandlingen bedre end bakterierne. Derfor ledte behandlingen til en (i hvert fald midlertidigt) højere FBR, men en lavere samlet mikrobiel biomasse. En anden interessant obser-

vation var, at den mikrobielle aktivitet, udtrykt ved respiration og nettomineralisering af N, steg efter genvædningen sammenlignet med aktiviteten før udtørring.

PH

I Lauber et al. (2008) var pH den mest afgørende faktor for bakteriesamfundenes sammensætning. pH-værdierne var dog ekstremt lave på tværs af datasættet og arealanvendelserne (3,6-4,7). De fandt i øvrigt, at FBR beregnet på baggrund af kvantitativ PCR-analyse var højest i skove og lavest i landbrugsjord, men de fandt ingen signifikant korrelation mellem arealanvendelse og FBR.

Rousk et al. (2003) undersøgte effekten af jordens pH på vækst- og masseforhold mellem svampe og bakterier. De udtog jordprøver på en mark, hvor pH-værdien varierede fra ca. 8 til under 4 fra den ene ende til den anden ende. Marken, kaldet the Hoosfield Acid Strip, havde fået én enorm tildeling af kalk engang i 1800-tallet, og siden var den ikke blevet tildelt nogen former for input. Marken gav derfor en unik ulighed for at isolere effekten af pH på f.eks. jordens mikroliv. Forfatterne anførte, at der ikke var rapporteret signifikante udbytteforskelle i tidligere forsøg mellem pH 4,5 og 8. Under pH 4,5 faldt udbytterne dog drastisk. Rousk et al. (2009) fandt, vha. selektiv inhibition og PLFA-analyse, at bakteriernes vækst generelt steg med stigende pH, mens forekomsten af bakteriel PLFA var tæt på konstant, med en svagt stigende tendens ved stigende pH. Omvendt var svampevæksten på sit højeste ved en pH lige under 5, og den faldt med stigende pH, mens forekomsten af svampederiveret PLFA var højest omkring pH 6 og faldt mod begge pH-yderpunkter. Forholdet mellem svampe- og bakteriespecifik PLFA var dermed højest omkring pH 6.



TEMPERATUR

Flere studier har undersøgt effekten af temperatur på kulstofudnyttelseseffektiviteten (CUE), men ikke direkte på FBR (Dijkstra et al., 2011; Manzoni et al., 2012). Visse resultater peger på, at stigende temperatur sænker CUE (Manzoni et al., 2012), mens andre undersøgelser konkluderer, at temperaturen spiller en mindre rolle (Dijkstra et al., 2011).

C:N-FORHOLD

Det er veldokumenteret, at jordens C:N-forhold har stor indflydelse på FBR (Zhang, 2011; Lauber et al., 2008). Tendensen er, at højere C:N-forhold medfører højere FBR, og Wang et al. (2019) pointerer, at C:N-forholdet i svampes biomasse er højere (5-15) end bakteriers (3-6), hvilket kan betyde, at bakterier, som har brug for mere N pr. enhed C end svampe, begrænses støkiometrisk ved højere C:N-forhold.

FBR's betydning for kulstofopbygning i jorden

Tidligere har det været foreslået, at svampe har en højere CUE end bakterier (Sakamoto & Oba, 1994). Bailey et al. (2002) fandt dog, at svampeaktivitet i absolut forstand havde større indflydelse på CUE end forholdet mellem svampe- og bakterieaktivitet.

Malik et al. (2016) fandt, at en højere FBR var korreleret med højere CUE, men de angav hverken total forekomst eller aktivitet af hhv. svampe og bakterier, så det er ikke til at sige, hvorvidt deres resultater stemte overens med Bailey et al. (2002).

Soares & Rousk (2019) fandt omvendt, at højere FBR førte til lavere CUE, og at den mest bestemmende faktor for CUE var kvaliteten af tilførte planterester, hvor bedre kvalitet (lavere C:N) førte til lavere FBR og større CUE.

Der er altså umiddelbart ingen tydelig sammenhæng mellem FBR og CUE, og andre faktorer, såsom C:N-forhold i friskt tilført organisk materiale, ser ud til at have en større betydning for kulstofopbygning i jorden. Kopittke et al. (2020) viste f.eks., at lavere C:N, dvs. større N-tilgængelighed, var korreleret til dannelsen af nye organo-mineralske bindinger, og resultaterne tydede på, at det primært er N-rige mikrobielle metabolitter (proteinøse forbindelser), som danner disse nye forbindelser til jordminerale, hvor andre organiske forbindelser primært binder sig til eksisterende organo-mineralske klynger.

I det følgende afsnit diskuteres resultater fra et langvarigt forsøg i Schweiz, som kan bidrage til forståelsen af forholdet mellem jordens mikrobiologi og kulstofbinding.



Dyrkningssystemernes betydning for FBR

KONVENTIONEL VS ØKOLOGISK VS BIODYNAMISK

DOK-forsøget, som har kørt siden 1977, sammenligner tre dyrkningssystemer med hver to gødningsregimer: Konventionelt med husdyrgødning (CONFYM), konventionelt udelukkende med mineralisk gødning (CONMIN), økologisk med gødning svarende til 0,7 DE/ha (BIOORG 1) økologisk med gødning svarende til 1,4 DE/ha (BIOORG 2), biodynamisk m. 0,7 DE/ha (BIODYN 1) og biodynamisk m. 1,4 DE/ha (BIODYN 2). Der er også et kontrolled, som ikke bliver gødsket (NOFERT).

Joergensen et al. (2010) undersøgte jord fra CONFYM, CONMIN, BIOORG og BIODYN. Desværre angiver de ikke, ved hvilket gødningsniveau de økologiske behandlinger blev undersøgt, men det antages her at være af mindre betydning. Deres resultater viser, at BIODYN havde den største mikrobielle biomasse, og den laveste FBR, mens CONMIN havde den mindste mikrobielle biomasse, og den højeste FBR.

I en større rapport om DOK-forsøgets resultater (Fliessbach et al. 2024) vises det, at BIODYN 2 er den eneste behandling, som har medført signifikant netto kulstofopbygning (+12% i 0-20 cm, svarende til godt 100 kg C/ha/år). BIOORG 2 og CONFYM opretholdt deres kulstofniveauer, med en ikke-signifikant stigning, og alle systemerne med reduceret gødningstildeling tabte kulstof i forsøgets forløb. Værst så det ud i NOFERT, som har tabt 234 kg C/ha/år. Der var inden signifikant forskel i jordens kulstofindhold i de dybere jordlag (20-50 cm) mellem de fuldgødskede led (BIOORG 2, BIODYN 2, CONFYM 2 og CONMIN), men leddene med reduceret gødskning havde signifikant mindre kulstof i 20-30 cm end BIODYN 2, og NOFERT havde signifikant mindre endnu.

I samme publikation vises det, at BIODYN 2 havde den største mikrobielle biomasse, efterfulgt af BIOORG 2. Mikrobiel biomasse i CONFYM 2 var på højde med BIODYN 1. Interessant nok var den metaboliske kvotient (qCO_2), som angiver forholdet mellem respireret CO_2 og mikrobiel C (total mikrobiel biomasse), dvs. hvor meget energi, mikroorganismene skal bruge på at opretholde deres biomasse, lavest i BIODYN 2 og højest i CONMIN, selvom den samlede respiration var højest i BIODYN 2.

Hvad angår udledninger af klimagasserne metan og lattergas, var de højest i CONFYM 2, efterfulgt af CONMIN, BIOORG 2 og BIODYN 2.

Udbytterne var lavere i de økologiske behandlinger end i de konventionelle, på nær i sojabønner, hvor de var 1% højere (ikke signifikant). I kartofler var forskellen mellem økologiske og konventionelle udbytter -21%, i kartofler -34%, i kløvergræs -10%, og i majs til ensilage -13%. Den gennemsnitlige N-tildeling på tværs af afgrøder fra 1985-2019 er opgjort til 171 kg/ha i CONFYM, 121 kg N/ha i CONMIN, 96 kg N/ha i BIOORG 2 og 93 kg N/ha i BIODYN 2. Dermed er der tildelt næsten dobbelt så meget gødning i CONFYM som i BIODYN 2 og BIOORG 2, mens den største udbytteforskel var + 50% i kartofler (økologiske kartofler gav 66% af de konventionelle).

Der er altså god grund til at tro, at forholdene for mikrolivet i jorden var bedst i BIODYN 2, som også var det eneste led med statistisk signifikant kulstofopbygning, selvom FBR altså var lavest i BIODYN 2. DOK-forsøget peger på, at næringsstofudnyttelse, kulstofopbygning, vandhusholdning og klimaregnskab er positivt korreleret med mængden af mikrobielt liv i jorden, og at denne korrelation ikke findes til FBR.

KONVENTIONEL VS. (KONV.) REDUCERET JORDBEARBEJDNING VS. ØKOLOGISK

I DOK-forsøget bliver alle behandlinger pløjet og harvet. De økologiske behandlinger bliver harvet og striglet hyppigere for at bekæmpe ukrudt. Der er imidlertid meget der tyder på, at dyb, vendende jordbearbejdning påvirker mikrolivet – især svampe – negativt.

I et 4-årigt dyrkningsforsøg undersøgte Ghimire et al. (2014) effekten af tre dyrkningssystemer, konventionelt med alm. jordbearbejdning (CV), konventionel med reduceret jordbearbejdning (RT) og økologisk med alm. jordbearbejdning (OR) i hhv. enårig kerne- /frøproduktion og flerårig



grovfoderproduktion. Forsøgsarealet havde været dyrket med ensidig, konventionel majs i mindst 6 år inden forsøgets start.

Forfatterne rapporterede, at både mikrobiel biomasse og FBR (målt vha. PLFA) steg markant i alle forsøgsled, og denne stigning fra år 1 til år 4 var større i alle led end forskellene mellem leddene. Mikrobiel biomasse i den enårig rotation steg mest i OR og mindst i CV, hvorimod stigningen var størst i RT i den flerårige rotation, og mindst i CV. FBR steg lige meget i alle behandlinger i begge rotationer.

Forsøget tyder altså på, at afgrødevalg og sædskifte har større betydning for FBR end jordbearbejdning.

Praksistiltag som påvirker FBR

I en større metaanalyse undersøgte Morugán-Coronado et al. (2022) effekten af afgrødediversificering (samdyrkning og sædskifte), jordbearbejdning og gødningstype på mikrobiel biomasse og forekomst af svampe og bakterier. I deres analyse var det kun samdyrkning og sædskifte, som signifikant øgede forekomsten af svampe og dermed FBR. Organisk gødning øgede den samlede mikrobielle biomasse signifikant, sammenlignet med mineralsk gødning, og fraværet af gødning sænkede den mikrobielle biomasse. Reduceret jordbearbejdning medførte signifikant øget biomasse af både svampe og bakterier end alm. jordbearbejdning, mens No-Till kun påvirkede svampe positivt (ikke signifikant). Den positive effekt på forekomsten af svampe var større i reduceret jordbearbejdning end i No-Till, men reduceret jordbearbejdning medførte samtidig en stor stigning i forekomsten af bakterier, som samlet set sænkede FBR sammenlignet med No-Till.

GØDNING

Bardgett et al. (1996) undersøgte effekten af gødsning, kalkning og afgræsning på FBR målt med PLFA. De fandt, at gødningen (mineralsk NPK) påvirkede forekomsten af svampe negativt, hvilket resulterede i en lavere FBR.

De Vries et al. (2006) undersøgte effekten af stigende kvælstoftildeling hhv. græs i renbestand og kløvergræs. De fandt, at den mikrobielle biomasse og FBR (målt ved direkte mikroskopi) var højere i ren græs end i kløvergræs, og at FBR faldt med stigende tildeling af N. Der var ingen effekt på FBR af gødningstype, hhv. gylle eller fast staldgødning.

JORDBEARBEJDNING

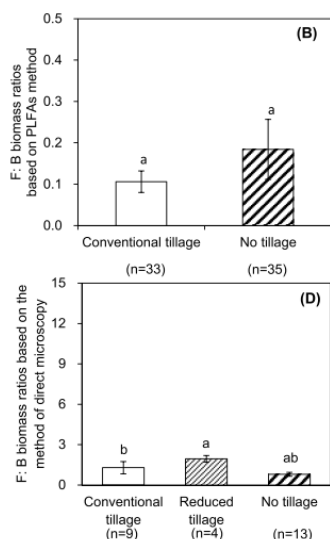


Fig. 2. Soil fungi to bacteria ratios in different types of forests: (A) The data of broadleaved forest, coniferous forest and mixed forest from Appendix S2 based on the method of PLFAs (Phospholipid fatty acids); (B) The data of conventional tillage and no tillage from Appendix S4 based on the method of PLFAs; (C) The data of broadleaved forest, coniferous forest and mixed forest from Appendix S3 based on the method of direct microscopy; (D) The data of conventional tillage, reduced tillage, and no tillage from Appendix S3 based on direct microscopy.

I Wang et al. (2019) sås en ikke-signifikant forskel mellem No-Till og alm. jordbearbejdning, når FBR blev gjort op vha. PLFA, og en signifikant forskel mellem alm. og reduceret jordbearbejdning, ved



FBR-bestemmelse med direkte mikroskopi. Ved direkte mikroskopi sås dog ingen forskel mellem No-Till og hhv. alm. og reduceret jordbearbejdning.

Reduceret jordbearbejdning øgede mikrobiel biomasse, men ændrede ikke FBR i en global metaanalyse fra Chen et al. (2020).

Frey et al. (1999) undersøgte effekten af No-Till vs. pløjning og fandt, at FBR korrelerede tættere med jordens vandindhold end med jordbearbejdning.

Findes der en optimal FBR?

Pulleman et al. (2022), undersøgte dette spørgsmål i en omfattende oversigtsartikel, og deres konklusion bringes her (min oversættelse):

"Vi konkluderer, at ideen, om at en højere FBR medfører en øget opbygning af kulstof og næringsstoffer, ikke afspejler den aktuelle økologiske forståelse af komplekse, multifunktionelle fødenetværk i jorden."

De advarer mod at opstille dikotomiske modsætningspar, såsom bakterier vs. svampe, og mod brugen af FBR i naturlige systemer som en guideline for jordsundhed i landbrugssammenhænge.

Konklusion

Der er ikke meget, der tyder på, at forholdet mellem svampe og bakterier (FBR) i jord er særlig vigtigt i sig selv. Desuden er der en kæmpe variation i FBR-værdier, afhængigt af opgørelsesmetode. Også inden for samme opgørelsesmetode ses store usikkerheder, og navnlig når forholdet opgøres vha. direkte mikroskopi. Ideen om, at svampe er "bedre" for plantevækst og jordbundsforhold og bakterier er heller ikke entydigt underbygget. I landbrugsjord tyder de mest robuste studier på, at den samlede mikrobielle biomasse er vigtigere end FBR, og at FBR typisk ligger under 1 i de mest frugtbare jorder.

Dog er der grund til at mene, at landbrugsjord generelt giver dårligere betingelser for mikroliv end naturlig jord, ikke mindst for svampe, og mange marker ville sandsynligvis kunne understøtte en mere bæredygtig produktion, hvis forholdene for svampe og andet mikroliv blev forbedret.



Referencer

- Anderson & Domsch, 1975, *Measurement of bacterial and fungal contributions to respiration of selected agricultural and forest soils*. <https://doi.org/10.1139/m75-045>
- Angst, G., Mueller, K. E., Nierop, K. G., & Simpson, M. J. (2021). Plant-or microbial-derived? A review on the molecular composition of stabilized soil organic matter. *Soil Biology and Biochemistry*, 156, 108189. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2021.108189>
- Bardgett et al., 1996 - Changes in soil fungal:bacterial biomass ratios following reductions in the intensity of management of an upland grassland, <https://doi.org/10.1007/BF00382522>
- Bardgett & McAlister, 1999, The measurement of soil fungal:bacterial biomass ratios as an indicator of ecosystem self-regulation in temperate meadow grasslands. <https://doi.org/10.1007/s003740050554>
- Bååth & Anderson, 2003, *Comparison of soil fungal/bacterial ratios in a pH gradient using physiological and PLFA-based techniques*, [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(03\)00154-8](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(03)00154-8)
- Blagodatskaya & Anderson, 1996, Interactive effects of pH and substrate quality on the fungal-to-bacterial ratio and qCO₂ of microbial communities in forest soils, [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(98\)00050-9](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(98)00050-9)
- Chen et al., 2020, *Global meta-analyses show that conservation tillage practices promote soil fungal and bacterial biomass*. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2020.106841>
- de Ruiter, et al., 1993 - *Calculation of nitrogen mineralization in soil food webs*. <https://doi.org/10.1007/BF00011055>
- de Vries et al., 2006, *Fungal/bacterial ratios in grasslands with contrasting nitrogen management*, <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2006.01.008>
- Dijkstra et al., 2011, Effect of temperature on metabolic activity of intact microbial communities: evidence for altered metabolic pathway activity but not for increased maintenance respiration and reduced carbon use efficiency. <http://dx.doi.org/10.1016/j.soilbio.2011.05.018>
- Djemiel et al., 2023, *Biogeographical patterns of the soil fungal:bacterial ratio across France*. <https://doi.org/10.1128/msphere.00365-23>
- Drenovsky et al., 2004, *Soil Water Content and Organic Carbon Availability Are Major Determinants of Soil Microbial Community Composition*. <https://doi.org/10.1007/s00248-003-1063-2>
- Fliessbach, A., Krause, H-M., Jarosch, K., Mayer, J., Oberson, A., & Mäder, P. (2024). The DOK trial: A 45-year comparative study of organic and conventional cropping systems. Research Institute of Organic Agriculture FiBL, Frick. <https://www.fibl.org/fileadmin/documents/shop/1741-dok-dossier-en.pdf>
- Frey et al., 1999, *Bacterial and fungal abundance and biomass in conventional and no-tillage agroecosystems along two climatic gradients*. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2009.09.023>
- Gadd 2006, Geomycology: biogeochemical transformations of rocks, minerals, metals and radionuclides by fungi, bioweathering and bioremediation. <https://doi.org/10.1016/j.mycres.2006.12.001>
- Ghimire et al., 2014, Soil Microbial Substrate Properties and Microbial Community Responses under Irrigated Organic and Reduced-Tillage Crop and Forage Production Systems. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0103901>
- Johnson et al., 2015, Development of soil microbial communities for promoting sustainability in agriculture and a global carbon fix (Pre-Print, dvs. ikke fagfællebedømt). <https://doi.org/10.7287/peerj.preprints.789v1>



- Joergensen & Wichern, 2008, Quantitative assessment of the fungal contribution to microbial tissue in soil. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2008.08.017>
- Khan et al., 2016, Microbial biomass, fungal and bacterial residues, and their relationships to the soil organic matter C/N/P/S ratios. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.02.019>
- Kopittke et al., 2020, Soil organic matter is stabilized by organo-mineral associations through two key processes: The role of the carbon to nitrogen ratio. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.113974>
- Lauber et al., 2008, *The influence of soil properties on the structure of bacterial and fungal communities across land-use types*. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2008.05.021>
- Malik et al., 2016, *Soil fungal:bacterial ratios are linked to altered carbon cycling*: <http://dx.doi.org/10.3389/fmicb.2016.01247>
- Manzouni et al., 2012, *Environmental and stoichiometric controls on microbial carbon-use efficiency in soils*, <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2012.04225.x>
- Morugán-Coronado et al., 2022 - The impact of crop diversification, tillage and fertilization type on soil total microbial, fungal and bacterial abundance: A worldwide meta-analysis of agricultural sites. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2022.107867>
- Nadezhda et al., 2014, *Fungi-to-bacteria ratio in soils of European Russia*. <https://doi.org/10.1080/03650340.2014.940916>
- Oskonbaeva et al. (2024). From dry to thrive: Increased metabolic activity, potassium content and a shift towards fungi after drying-rewetting reveals adjustment of the microbial community to osmotic stress. *Applied Soil Ecology*, 202, 105578. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2024.105578>
- Prescott et al., 2020, *Surplus Carbon Drives Allocation and Plant–Soil Interactions*. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2020.08.007>
- Pulleman et al., 2022, *Soil biodiversity and nature-mimicry in agriculture; the power of metaphor?* <https://doi.org/10.1177/00307270221080180>
- Rousk & Bååth, 2007, Fungal and bacterial growth in soil with plant materials of different C/N ratios, <https://doi.org/10.1111/j.1574-6941.2007.00398.x>
- Rousk et al., 2009, Contrasting Soil pH Effects on Fungal and Bacterial Growth Suggest Functional Redundancy in Carbon Mineralization. <https://doi.org/10.1128/AEM.02775-08>
- Sakamoto & Oba, 1994 - Effect of fungal to bacterial biomass ratio on the relationship between CO₂ evolution and total soil microbial biomass. <https://doi.org/10.1007/BF00418670>
- Sharma, P., & Bhakri, G. (2019). Role of Bacteria in Pedogenesis. *Mycorrhizosphere and Pedogenesis*, 167-179. https://doi.org/10.1007/978-981-13-6480-8_10
- Soares & Rousk, 2019, *Microbial growth and carbon use efficiency in soil: Links to fungal-bacterial dominance, SOC-quality and stoichiometry*, <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2019.01.010>
- Thiet et al., 2006, Do growth yield efficiencies differ between soil microbial communities differing in fungal:bacterial ratios? Reality check and methodological issues, <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2005.07.010>
- Wang et al., 2019, *Fungi to bacteria ratio: Historical misinterpretations and potential implications*, <https://doi.org/10.1016/j.actao.2018.10.003>