

5 - ZNACZENIE MIKROORGANIZMÓW

5.1 Paradoksalny spadek poziomu materii organicznej

Nieuwzględnienie złożonych procesów życia w glebie doprowadziło do kilku spektakularnych skutków w praktykach agronomicznych, z których nieliczne już zauważyliśmy. Jeden z nich powinien być dla nas oczywisty już dawno temu, a mianowicie ciągły spadek poziomu materii organicznej w glebach rolnych od 1950 roku. Wraz ze wzrostem plonów biomasy roślin uprawnych (związanym również ze wzrostem nakładów na produkcję), ekosystem uprawny nigdy nie zwracał tak dużo materii organicznej do gleby, a mimo to nigdy nie mieliśmy jej tak wielkiego jej niedoboru.

5.1.1 Równanie materii organicznej

Podręczniki rolnicze z XX wieku wyjaśniały, że nowe metody uruchomią koło sukcesu: więcej nawozów, wyższe plony, więcej materiału organicznego zwróconego do gleby, a więc więcej próchnicy. Nadzieja, że im więcej się wkłada, tym więcej się magazynuje, była płona. Stosowane do dziś obliczenia bilansu humusowego są czystą spekulacją. Współczynnik równowagi powstawania i rozkładu próchnicy K_1 wyraża wydajność przemiany materii organicznej w stabilną próchnicę, który przyjmuje się jako stały dla każdego rodzaju materiału (np. 0,15 dla słomy). Jednak K_1 zależy on nie tylko od materiału, ale także od warunków humifikacji. Są to wartości średnie, które możemy poprawić lub pogorszyć poprzez praktyki uprawowe. Jeśli chodzi o współczynnik mineralizacji materii organicznej, K_2 , to również jest on oceniany jako stały. Jednak z pewnością nie jest on stały, gdyż zależy od roślin okrywowych, nawożenia i uprawy roli, które wpływają na różne łańcuchy procesów glebowych. Bilans humifikacji i mineralizacji stanowi podstawę równań organizmów żywych, które - ku wielkiej rozpaczy całego pokolenia agronomów - nigdy nie zostały obliczone. Jak mogliśmy dojść do takiej paradoksalnej sytuacji?

5.1.2 Wszystko zależy od rodzaju użytych mikroorganizmów

Fakt, że poziom materii organicznej spada, jest dowodem na to, że kwestia poziomu materii organicznej w glebie nie jest po prostu kwestią arytmetyki pomiędzy

wprowadzanymi do gleby ilościami a wynikami. Zjawisko to jest w rzeczywistości w dużo większym stopniu wynikiem praktyk agronomicznych, które ukierunkowały życie w glebie na mineralizację, a nie na humifikację. Grzyby budujące próchnicę są systematycznie uszkadzane przez obecne praktyki rolnicze, w szczególności przez systematyczne stosowanie fungicydów, stosowanie głębokiej orki, nawozów zielonych, które bardziej przypominają salate, niż drewno, lub aplikację nawozów syntetycznych powodujących zasolenie gleby. Z drugiej strony systematycznie jest faworyzowana flora bakteryjna, która jest mniej wrażliwa na te praktyki i silnie mineralizuje młodą materię organiczną.

5.1.3 Dobre intencje działań, które wymagają poprawy

Dopóki mechanizmy te nie zostaną poznane, zrozumiane i uwzględnione w procesie decyzyjnym, dopóty obecne praktyki agrotechniczne będą kierować gleby w stronę mineralizacji. Dzieje się tak niezależnie od rodzaju rolnictwa, jak bardzo „zielone” mogło by się ono wydawać. Pomijając wszelkie refleksje na ten temat, rolnictwo ekologiczne i rolnictwo zrównoważone chroniące zasoby naturalne wciąż mają ogromne pole do popisu w zakresie reorientacji praktycznego rolnictwa na rzecz efektywnego i długoterminowego magazynowania węgla w glebie. Analizy wielu publikacji i wspólne prace INRA i Arvalis Institut du Végétal (*Effets du travail du sol sur les cycles bioogéochimiques (azote et carbone)*, 2014) wykazały na przykład, że praktyki bezuprawowe są bardziej skuteczne niż ekologiczne i modyfikują rozmieszczenie materii organicznej w glebie, ale już nie mają wpływu na jej zwiększanie jej ilości i magazynowanie. „Głównym efektem uprawy uproszczonej jest stworzenie rozwarstwienia materii organicznej w profilu. Zasoby węgla nie zostają zwiększone.” Ponadto badanie wskazuje na niewielki lub żaden wzrost wykorzystania praktyk bezuprawowych. Co więcej, powrót do systemu orkowego po zastosowaniu uprawy konserwującej prawdopodobnie nie spowoduje znacznego zmniejszenia zasobów węgla w glebie. „Chociaż istnieją dobre powody, by stosować techniki bezuprawowe, nie prowadzą jednak one do tego, by efektywnie mogły sekwestrować węgiel” - podsumowuje badanie. Co do globalnej emisji gazów cieplarnianych: „Bilans jest w średnio-niewielkim stopniu pogorszony przez uprawę roli. Nie jest ona decydującym kryterium dla przyjęcia praktyk bezuprawowych”. A więc maszyny uprawowe i orka nie są jedyną, najważniejszą przyczyną degradacji gleby! Nie ma w tym żadnej tajemnicy: jeśli chcemy przywrócić funkcje magazynowania węgla przez gleby, musimy najpierw zrozumieć mechanizmy związane z tym procesem.

5.1.4 Maksymalizacja zysków prowadzi do coraz większej degradacji gleby

Dlaczego nasze praktyki są, prawie wszędzie i we wszystkich systemach, niekorzystne dla sekwestracji węgla? Część odpowiedzi leży w fakcie, że powszechnie akceptowanym wskaźnikiem oceny wartości praktyki, prawidłowości działań, skuteczności nawozu lub opłacalności pestycydu jest plon. Nieświadomie, ale skutecznie, systematycznie wybieraliśmy wszystko, co degraduje glebę. Głównym zmagazynowanym kapitałem węgla jest próchnica glebowa. Mineralizacja materii organicznej jest procesem, który dostarcza roślinom składników odżywczych w idealnych proporcjach,

dostarczając nie tylko składniki mineralne, ale także bardziej złożone składniki organiczne, aminokwasy, cukry itp., już częściowo uformowane, będące gotowym budulcem życia. Wspominaliśmy już o tym w części A, dotyczącej pozytywnych, choć przejściowych skutków stosowania „cydów”. Niezależnie od rodzaju rolnictwa, praktyki przyczyniające się do mineralizacji materii organicznej systematycznie wypadają korzystniej w testach agronomicznych nakierowanych na plon. Sami przeprowadziliśmy próby przy zbyt słabym wzroście drzew owocowych. Zastosowanie metamu sodowego, biocydu o bardzo szerokim spektrum działania, który jest grzybobójczy, owadobójczy, chwastobójczy i nicieniobójczy, prowadzi początkowo do niezwyklego wzrostu wydajności, któremu towarzyszy zanik niedoborów żywieniowych, gdyż wszystko, co jeszcze było zmagazynowane w zniszczonej mikrofaunie i mikroflorze gleby, zostaje natychmiast udostępnione roślinom. Liczba nawozów, substancji czynnych środków ochrony roślin i zabiegów uprawowych prowadzących do takiego „czyszczenia magazynów glebowych” jest imponująca – są to praktycznie wszystkie „cydy”, źle skalibrowane nawozy N, P i K, głęboka orka, wadliwe oraz nadmierne wapnowanie, niektóre nawozy zielone, wpływ korzeni na dekompozycję materii organicznej gleby (*Rhizosphere Priming Effect*)...

5.1.5 Przywrócenie równowagi między sekwestracją a mineralizacją węgla

Degradacja materii organicznej gleby z definicji nie jest zrównoważona, a negatywne skutki tego uszczuplenia zasobów gleby są odczuwalne powoli, ale boleśnie. Poza faktem, że wyczerpywanie się zasobów zgromadzonych w glebie osiąga poziom, który osłabia odporność gleb, upraw i samej działalności rolniczej, to magazynowanie węgla w glebie nabiera obecnie bardziej uniwersalnego wymiaru. Jest to potencjalnie bardzo efektywna droga do zmniejszenia stężenia gazów cieplarnianych. W rolnictwie przywracającym potencjał biologiczny gleby wyzwaniem będzie znalezienie równowagi między sekwestracją a mineralizacją związków zawierających węgiel.

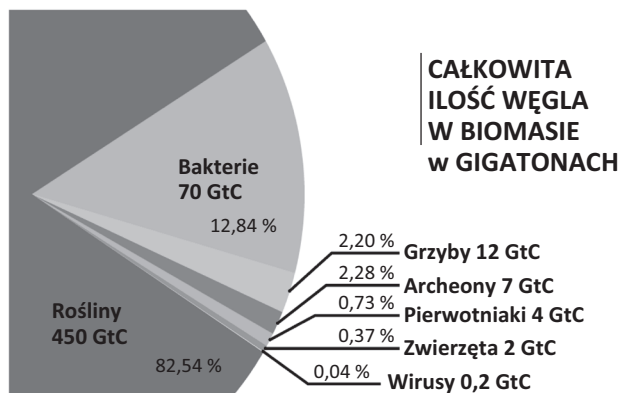
Osiągnięcie zysków netto w sekwestracji węgla jest całkowicie wykonalne i zgodne z różnymi systemami produkcji. Możliwe jest osiągnięcie magazynowania w glebie węgla netto oraz utrzymanie korzystnej i wystarczającej zdolności do jego mineralizacji. W tej części chcemy umożliwić lepsze zrozumienie dynamiki materii organicznej w glebach i zaproponować sposoby przywrócenia optymalnego zarządzania węglem w glebach.

5.2 Znaczenie mikroorganizmów

Zawartość materii organicznej w glebie jest saldem procesów humifikacji i mineralizacji. Mikroorganizmy kontrolują te przemiany materii organicznej w glebie. W tym rozdziale omówimy znaczenie poszczególnych grup mikroorganizmów w procesach przetwarzania i rozkładu materii organicznej, ale także dostarczania jej roślinom.

5.2.1 Podstawowe pojęcia, znaczenie aktywności biologicznej w glebie i recykling składników odżywczych

■ Biomasa jest w całości związana z glebą



Rysunek 5.1 - Rozkład biomasy lądowej według grup organizmów żywych (za Bar-On i in., 2018)

□ Skład biomasy

Z całkowitej biomasy świata szacowanej na około 600 gigaton (z czego tylko 1,3% znajduje się w oceanach), 82% stanowią rośliny. Następnie bakterie (12,84%), grzyby (2,20%), archeony (1,28%) i protisty (eukarionty, glony 0,73%). Ostatecznie zwierzęta stanowią zaledwie 0,37% biomasy Ziemi.

□ Mikroorganizmy, kluczowi gracze

Mikroorganizmy są wszechobecne w glebach. Ich udział wagowy jest prawie równy udziałowi korzeni, a powierzchnia wymiany jest znacznie większa, niż korzeni. Ich rola dla środowiska glebowego jest kolosalna. W dużej mierze kontrolują one cykl węglowy. Są strażnikami wymiany węgiel-gleba-atmosfera (Schimel i Schaeffer, 2012; Gleixner, 2013). Są zatem głównym (prawdopodobnie) podmiotem, który może sterować funkcjonowaniem gleby w różnych kierunkach i wpływać na cykl węglowy w skali globalnej.

■ Produkcja pierwotna zapewnia dawkę energii dla gleby

Biomasa glebowa mikroorganizmów czerpie energię głównie z wydzielin korzeniowych i martwych tkanek organicznych, w większości pochodzenia roślinnego. Te dwa źródła regularnie dostarczają mikroorganizmom „pożywienia i schronienia”. Pomiedzy “posiłkami” wyspecjalizowana mikroflora rozkładająca materię organiczną przechodzi w stan uśpienia i pozostawia pole działania dla innej flory, asymilacyjnej lub chemolitotroficznej.

■ Humifikacja i magazynowanie węgla

Próchnica (humus) jest materią organiczną gleby powstałą w wyniku przemian pierwotnej materii organicznej powstałej w wyniku fotosyntezy - głównie roślinnej i mikrobiologicznej. Próchnica składa się z kwasów humusowych: fulwowych i huminowych (materii organicznej relatywnie bogatej w azot) oraz humin. Różne procesy biologiczne prowadzą do wytworzenia próchnicy, ale z bardzo zróżnicowaną efektywnością pod względem jakości jak i ilości wytworzonego humusu.

Proces rozkładu i humifikacji resztek poźniwnych ma następujący średni efekt dla 1 kg resztek poźniwnych słomy (jest on znacznie mniej korzystny dla nawozu zielonego).

Tabela 5.1 - Produkty rozkładu 1 kg słomy i 1 kg nawozu zielonego oraz ich przekształcenie w różne rodzaje próchnicy

	Oddychanie - metabolizm	Nietrwała próchnica	Stabilna próchnica	Współczynnik K1
Słoma	600 do 800 gr	50 do 120 gr	20 do 60 gr	0,15
Nawóz zielony	800 do 950 gr	15 do 50 gr	5 do 15 gr	0,05

□ Bilans mineralny humusu

Humus składa się zasadniczo z C (węgla), N (azotu), S (siarki) i P (fosforu) w następujących proporcjach: 100 węgla /10 azotu /1 siarki /1 fosforu /1 potasu / oraz 0,1 pierwiastków mikroelementowych. Biorąc do obliczeń 3000 ton gleby/ha (patrz tabela) każdy procent substancji organicznej w glebie stanowi 30 ton na hektar. Jest to około 3000 kg azotu, 300 kg siarki, 300 kg fosforu i 30 kg mikroelementów. Tempo mineralizacji substancji organicznej jest bardzo zmienne i wynosi od 0,5 do 3%/rok). Zainteresowanie roślin tym składem wynika z faktu, że substancja pochodzi z organizmów żywych a humus praktycznie jest koncentratem z organizmów żywych i jego mineralizacja dostarcza do roztworu glebowego bogaty koktajl, który w pełni zaspokaja potrzeby roślin.

Tabela 5.2 - Bogactwo mineralne reprezentowane przez jeden procent glebowej materii organicznej (MOG) na hektar (w oparciu o masę 3000 ton gleby/ha)

MOG w kg/ha	C	N	S	P	Mikroelementy
30 000 kg	27 000 kg	3 000 kg	300 kg	300 kg	30 kg

Gleby sekwestrują ponad połowę dwutlenku węgla na Ziemi

Węgiel, który wchodzi do cyklu węglowego, występuje na Ziemi głównie w postaci materii organicznej. Żywa biosfera Ziemi zawiera mniej więcej tyle samo (620 GtC) węgla co atmosfera. Materia organiczna w glebach, składająca się ze zhumifikowanych i rozkładających się tkanek roślinnych i zwierzęcych, a także z żywych zbiorowisk mikroorganizmów i makrofauny, zawiera ponad dwukrotnie więcej węgla, łącznie około 1580 GtC (Gleixner *i in.*, 2001).

□ Współczynnik mineralizacji materii organicznej K₂ jest zmienny

W warunkach gleby nie uprawianej magazynowana w niej substancja organiczna będzie mineralizowana bardzo powoli. Natomiast przy intensywnej uprawie roli zostanie ona zmineralizowana w znacznie większych ilościach wskutek zwiększonego natlenienia. W zależności od sposobu uprawy gleby mineralizacja i rozkład materii organicznej będzie zachodziło w ilości od 0,5 do 3%/rok (K₂). W dolnej granicy tego zakresu (0,5%) będziemy mieli często problematyczne miejsca z nieprzetworzoną materią organiczną (płytkie gleby zwietrzelinowe, torfowiska, zimne gleby ze zbyt dużą ilością nawozów organicznych). Z drugiej strony, w kierunku wysokiego zakresu (3%), w dobrych glebach gliniastych z intensywnymi uprawami (buraki, ziemniaki, warzywa), gdzie będziemy mieli szybkie spadki poziomu próchnicy. Przyspieszona mineralizacja przynosi obfite plony, ale również obfite marnowanie węgla i azotu magazynowanego w materii organicznej gleby. Tak dzieje się w przypadku zaorywania użytków zielonych. Zmienność procesu mineralizacji jest jednym z czynników, pośród wielu innych, które zawsze będą pokazywać prawdę przeczącą najlepszym prognozom bilansowego, "księgowego" tworzenia próchnicy.

□ Ilość wymieszanych z glebą resztek organicznych to nie wszystko

Obecnie modele prognostyczne dotyczące przekształcania materii organicznej w glebie nadal opierają się zasadniczo na ilości zwracanej glebie substancji organicznej. W rzeczywistości jednak dynamika przemian glebowej materii organicznej znajduje się głównie pod kontrolą drobnoustrojów. W związku z tym, to co jest istotne z punktu widzenia tworzenia próchnicy decydująca jest nie ilość dodanej materii do gleby, ale aktywność pewnych grup mikroorganizmów. Wiedząc o tym możemy założyć, że tempo sekwestracji węgla w glebach z pewnością będzie bardziej zależne od zmian klimatu i roślinności, niż dotychczas sądzono. Jednak założenia te nadal nie są włączone do modeli zmian klimatu (Detlef, 2005) i rzadko są uwzględniane przy wdrażaniu praktyk rolniczych.

5.2.2 Mikroorganizmy: główni dyrygenci dynamiki tworzenia próchnicy

Mikroorganizmy są głównymi dyrygentami cyklu materii organicznej w glebie. Oto przegląd różnych uczestników tego procesu i ich zdolności lub niezdolności do tworzenia dużych ilości stabilnej i funkcjonalnej próchnicy.

■ Grzyby

1. **Grzyby pełnią** ważne funkcje w obiegu wody, obiegu składników odżywczych, obiegu węgla i zdrowiu roślin. Grzyby glebowe można podzielić na trzy grupy funkcjonalne w zależności od ich preferencji żywieniowych.
2. **Grzyby saprofityczne**, w tym podstawczaki i workowce przekształcają martwą materię organiczną w biomasę grzybów, dwutlenek węgla (CO₂) i inne związki chemiczne, takie jak kwasy organiczne. Niektóre z tych grzybów są patogeniczne. Grzyby te zwykle wykorzystują złożone związki, takie jak celuloza i lignina. Mogą również uczestniczyć w rozkładzie naturalnych lub syntetycznych zanieczyszczeń organicznych, np. pestycydów. Przyczyniają się do zwiększenia akumulacji materii organicznej bogatej w kwasy humusowe, które są odporne na degradację i mogą pozostawać w glebie przez setki lat.
3. **Symbiotyczne grzyby mykoryzowe** kolonizują korzenie roślin. W zamian za związki węgla uzyskiwane od rośliny, grzyby mykoryzowe pomagają rozpuszczać fosfor, mineralizować próchnicę (przez związaną mikroflorę) i dostarczać roślinie składniki odżywcze gleby (fosfor, azot, pierwiastki mikroelementowe i ewentualnie wodę).
4. **Grzyby chorobotwórcze** lub pasożytnicze (niektóre z nich są również saprofityczne). Grzyby chorobotwórcze przenoszone drogą powietrzną (mączniaki, fuzaria, septorie itp.) oraz grzyby chorobotwórcze korzeni, z rodzin takich jak *Verticillium*, *Pythium* i *Rhizoctonia*, są w zasadzie „oportunistami”, którzy wykorzystują słabości roślin. Są czyścicielami ekosystemu.

□ Grzyby - organizmy ściśle tlenowe

Grzyby należące do podstawczaków i workowców są organizmami ściśle tlenowymi, mogą rozwijać się tylko w obecności tlenu. Grzyby glebowe są więc bardzo wrażliwe na brak tlenu, zagęszczenie gleby i nadmierne nawodnienie. Dlatego tak ważna jest obserwacja struktury gleby (patrz „profil glebowy”). Ani grzyby saprofityczne, ani mykoryzowe nie cenią sobie środków grzybobójczych. Preferują pH kwaśne do lekko kwaśnego, stąd tak ważne jest prawidłowe stosowanie polepszaczy gleby i nawozów (patrz rozdział „Nawożenie”). Są bardzo wrażliwe na uprawę roli.

□ Saprofity: organizmy, którym sprzyja obecność drewna (lignin)

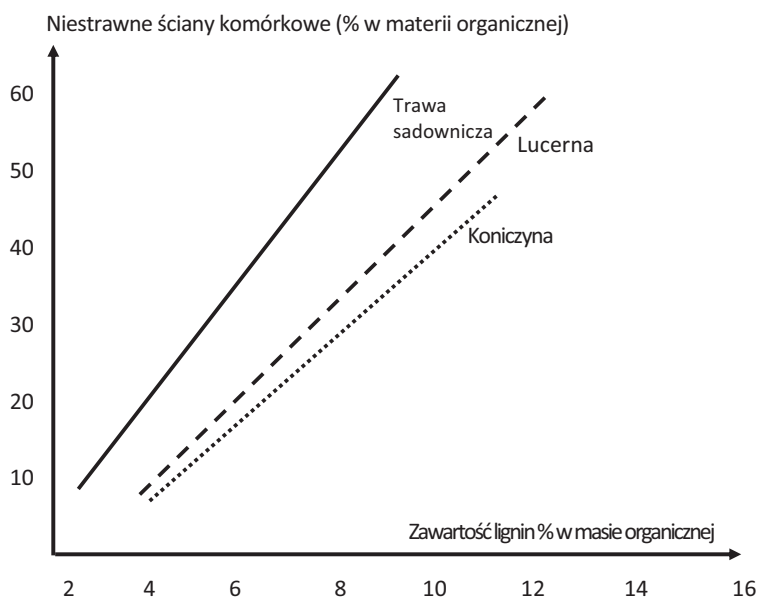
Saprofity (podstawczaki i workowce) cenią sobie dostępność materiałów bogatych w celulozę i ligninę jako pożywienie, co daje im przewagę konkurencyjną nad bakteriami, gdy przyorujemy słomę. Odwrotna sytuacja ma miejsce, gdy do gleby trafiają nawozy zielone. Grzyby „rozkładacze” roślin bardzo efektywnie wykorzystują i magazynują węgiel (40-55% węgla pierwotnego) i same mają dość wysoki stosunek węgla do azotu C:N wynoszący od 10:1 do 25:1. Zawartość ligniny ma znacznie większe znaczenie dla tempa degradacji przez grzyby, niż stosunek C:N w resztkach roślinnych, gdyż lignina jest związkiem złożonym i dłużej trwa jej przetwarzanie w glebie). Wysoka zawartość ligniny jest znacznie bardziej decydująca w preferowaniu rozwoju konkretnych grup grzybów. W istocie tylko grzyby są wyposażone w arsenał enzymatyczny przydatny do tej operacji i dzięki temu są w stanie uwolnić celulozę związaną z

ligninami. Za każdym razem, gdy do gleby podawana jest masa organiczna bogata w ligninę, faworyzowane są grzyby i inni współtwórcy próchnicy. Za każdym razem, gdy dostarczana jest dawka substancji organicznej bogata w pierwiastki rozpuszczalne i celulozę, sprzyja się aktywizacji pokarmowych łańcuchów bakteryjnych.

□ Dawka żywieniowa plus minus dostosowana do potrzeb grzybów

Strawność pasz dla krów jest dobrze udokumentowanym przykładem tego, że bakterie preferują materiały bogate w cukry proste i celulozę, a są źle przystosowane do trawienia ligniny. Żwacz krowy to prawdziwa fabryka degradująca celulozę. Żwacz jest zasiedlony głównie przez bakterie celulolityczne przy braku, lub bardzo małej obecności grzybów. Strawność paszy przez krowę jest maksymalna (95-100%) w pierwszym poroście wiosennym, gdy zawartość ligniny jest praktycznie zerowa. Strawność paszy w żwaczu krowy maleje wraz z wiekiem roślin zielonych proporcjonalnie do udziału ligniny. W dalszej części artykułu zobaczymy, że ekologiczna rola przeżuwaczy w ekosystemach polega na zubożaniu zwracanej do gleby substancji organicznej w postaci obornika o celulozę i inne substancję łatwo rozpuszczalne.

Budowa stabilnej próchnicy w glebach wymaga odtworzenia dojrzałej lub strawionej przez przeżuwacza materii organicznej.



Rysunek 5.2 - Zależność między niestrawnością ścian komórkowych a zawartością w nich ligniny (w % materii organicznej, Jarrige, 1980)

□ Ekologia mykoryz

Mykoryzy nie tworzą się na korzeniach roślin kapustnych ani roślin szarłatowatych (kapusta, rzepak, gorczyca, buraki, szpinak itp.). Liczebność grzybów mykoryzowych znacznie spada, gdy rośliny z tych rodzin botanicznych są znacząco obecne w zmianowaniu. Grzyby mykoryzowe nie tolerują zaburzeń równowagi mineralnej, zwłaszcza w zakresie stosunku wapnia do magnezu, nadmiaru zawartości fosforu i azotu, co zobaczymy w rozdziale o nawożeniu. Częsta i głęboka uprawa roli jest dla nich szkodliwa, podobnie jak stosowanie fungicydów o szerokim spektrum działania.

Grzyby mykoryzowe tworzą strzępki, które są 20 do 50 razy cieńsze, niż korzenie roślin, rzędu mikronów, tj. porównywalne do wielkości cząsteczek mineralnych substancji ilastych. Ta cecha pozwala im na eksplorację miejsc niedostępnych dla korzeni roślin i dostarczanie im minerałów, w tym fosforu i azotu, a także wody, które w innym przypadku byłyby niedostępne. Jest to wymiana typu „win-win” z rośliną żywicielską, która dostarcza grzybowi związków węgla - zarówno cukrów, jak i tłuszczu. Roślina jest wielkim wygranym w tej wymianie. Dzieli się swoimi cukrami, ale zyskuje na „energii netto” dzięki tańszemu dostępowi do minerałów, gdyż to „przedłużenie korzeni” o cienkie strzępki grzyba, w porównaniu z jej własnymi korzeniami, pozwala na zaoszczędzenie ogromnych ilości asymilatów - węglowodanów. Dodatkowo rozwinięte grzybnie przyczyniają się do stabilności strukturalnej gleby i zapobiegają jej zagęszczaniu itp.

■ Bakterie

Bakterie są znacznie mniejsze od grzybów i są bardzo dobrze przystosowane do ekstremalnych i jednostronnych warunków środowiskowych. Susza, powódź, intensywna uprawa roli... Ich populacje przeżywają ekstremalne warunki, ponieważ mały rozmiar bakterii zawsze pozwala niektórym koloniom znaleźć mniej ekstremalne mikrosiedliska w glebie.

Bakterie są swoistym koncentratem aminokwasów i organelli, zawierającym 10-30% azotu. Są mniej wydajne, niż grzyby w przekształcaniu węgla z produkcji pierwotnej roślin w nowe cząsteczki organiczne. W sprzyjających warunkach szybko się rozmnażają, a ich populacja może się podwoić w ciągu 20 minut. W niesprzyjających warunkach, przy braku tlenu wiele bakterii fakultatywnie tlenowych stosuje metabolizm kryzysowy, który pozwala im przetrwać. W takich warunkach szybko rozwijają się bakterie beztlenowe. Aktywność beztlenowa jest jeszcze mniej wydajna z punktu widzenia pierwotnego wykorzystania węgla. Z 5 do 15% sprawności w przemianie węgla u bakterii tlenowych wydajność ta spada do 2 lub 3%, podczas gdy sprawność grzybów może wynosić nawet do 50%. W tych warunkach bakterie pozostawiają po sobie próchnicę złej jakości, bez potencjału wymiennego kationów (PWK), z cząsteczkami typowymi dla gleb podmokłych, a wszystko to z produkcją metanu i dwutlenku węgla. Ponadto wiele bakterii patogennych jest beztlenowych i takie warunki im sprzyjają.

Bakterie można podzielić na cztery szerokie kategorie:

- **Rozkładacze:** przyczyniają się do rozkładu martwej materii organicznej wprowadzonej do cyklu humifikacji i odżywiania roślin. Trawią najprostsze materiały: cu-

kry, skrobię, lipidy ze stosunkowo niską wydajnością (15 do 25% wykorzystania pierwotnego węgla).

- **Symbionty:** najbardziej godne uwagi są te, które wiążą azot z powietrza. Istnieją wolnożyjące, jak *Azotobacter*, *Azospirillum* itp., podczas gdy inne są w ścisłej symbiozie, takie jak *Rhizobium* (rośliny strączkowe) i *Frankia*. Dostarczają one roślinom związki azotu wzamian za węglowodany. Promieniowce, dawniej zaliczane do grzybów, przygotowują wstępnie miejsce dla grzybów, ale nie mają takiej skuteczności w rozkładzie lignin. Promieniowce to termofilne drobnoustroje, które lubią pH neutralne do zasadowego. To właśnie te mikroorganizmy nadają dobry „grzybowy” zapach glebom i podnoszą temperaturę pryzm kompostowych.
- **Patogeny:** *Erwinia*, *Pseudomonas*... Te oportunistyczne drobnoustroje to „czyściciele ekosystemów” i działają zgodnie z zasadami trofobiozy.
- **Litotrofy:** czerpią energię bezpośrednio z przekształcania chemicznego minerałów jako donorów elektronów. Reprezentowane są przez bakterie siarkowe, *Nitrosomonas*, bakterie żelazowe, anammox itp. To właśnie te bakterie, w kontakcie ze skałą macierzystą, odgrywają aktywną rolę w tworzeniu się gliny.

■ Pierwotniaki

Pierwotniaki są głównymi konsumentami bakterii. Ich populacja ewoluuje wraz z populacją bakterii. Jedną z ich podstawowych funkcji w glebie jest regulacja populacji bakterii przy jednoczesnym uwalnianiu azotu w postaci jonów amonowych dostępnych dla roślin.

■ Duże grupy organizmów działające w glebie mają różne potrzeby ekologiczne

W celu lepszego zarządzania magazynowaniem węgla użyteczne może być przedstawienie poniższej charakterystyki dwóch głównych grup organizmów glebowych. Cechy te dyktują strategię zarządzania nawożeniem, uprawą gleby i pokrywą roślinną, które proponujemy.

Tabela 5.3 - Charakterystyka porównawcza grzybów i bakterii

	Grzyby	Bakterie
Oddychanie - metabolizm	Ścisłe aerobowe	Warunkowo tlenowe lub ściśle beztlenowe
Wpływ uprawy roli	Wrażliwe	Stymulacja
Brak uprawy gleby	Bardzo korzystne	Obojętne
Wykorzystanie ligniny	Tak	Nie
Wykorzystanie celulozy	Tak	Tak
Preferowany C/N materii organicznej	C/N > 30 do 1 000	C/N 6 do 25
Wydajność przetworzenia pierwotnego węgla C	40-55 % Niemożliwe w warunkach beztlenowych	5-15% Warunki tlenowe 2-3% Warunki beztlenowe

Nadmiar fosforu i azotu	Inhibicja	Stymulacja
Wpływ zagęszczenia gleby	Inhibicja	Zmiany w metabolizmie
Wpływ zalania wodą gleby	Hamowanie/niszczenie	Zmiany w metabolizmie
Środki grzybobójcze	Bardzo wrażliwe	Obojętne
Stosunek C/N tkanek	10-25	5-7
Wymagania dotyczące azotu w pożywieniu	min. 0,2%	2% minimum
preferowane pH	5 do 6,8	5 do 8
Transport minerałów i wody	Do 15/20 cm	0
Ulepszanie struktury gleby	+++	+/-

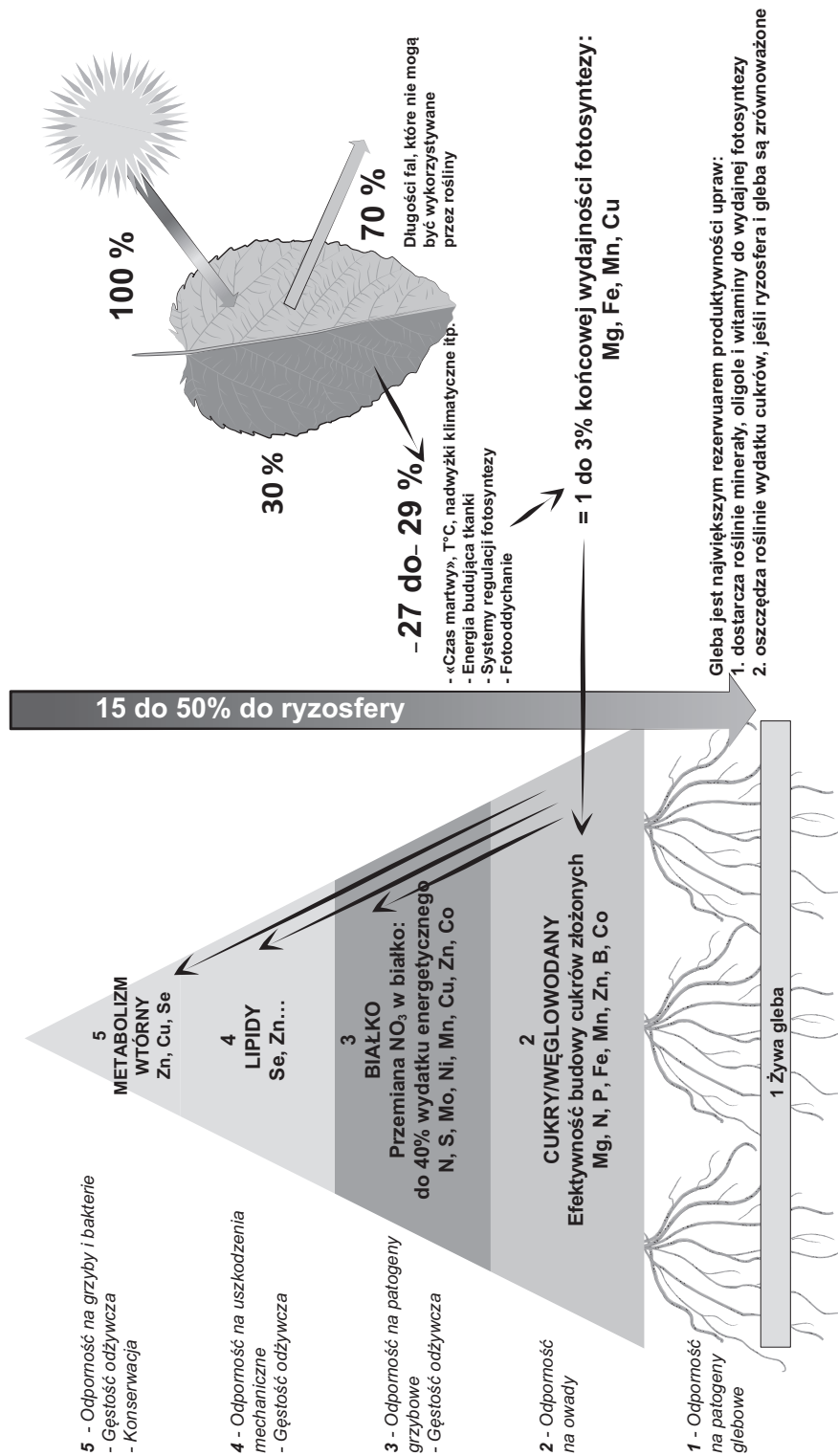
5.2.3 Znaczenie wydzielin korzeniowych

Rośliny „inwestują” w glebę poprzez swoje wydzieliny korzeniowe. Dzięki tym wydzielinom są one w stanie wpływać na mikrobiologię ryzosfery zgodnie ze swoim interesem, w sposób opisany poniżej. Te wydzieliny zasilają mikroflorę – grzyby i bakterie, które opisaliśmy. Jest to wciąż bardzo korzystna wymiana między rośliną a tymi mikroskopijnymi pomocnikami. Rośliny wytwarzają dzięki fotosyntezie cukry proste (glukozę), które przekazane mikroorganizmom służą im do budowy ich własnych komórek i innych złożonych substancji, które pozostawiają w glebie w postaci próchnicy lub w efekcie przekazywane są zwrótnie roślinom.

Przepływ energii i składników odżywczych jest dwukierunkowy. Gleba i ryzosfera dostarczają roślinie niezbędnie jej minerały, mikroelementy, witaminy i wodę. Roślina inwestuje od 15 do 50% efektów swojej fotosyntezy, aby zapewnić rozwój mikroflory ryzosfery. Jeśli roślina jest zmuszona do modyfikacji niekorzystnego środowiska korzeniowego, robi to za pomocą wydzielin korzeniowych. Modyfikacja środowiska na niekorzystny dla systemu korzeniowego może być stratą groźną dla życia rośliny. Stąd stałe zainteresowanie przywróceniem równowagi w glebie, opisane w części E.

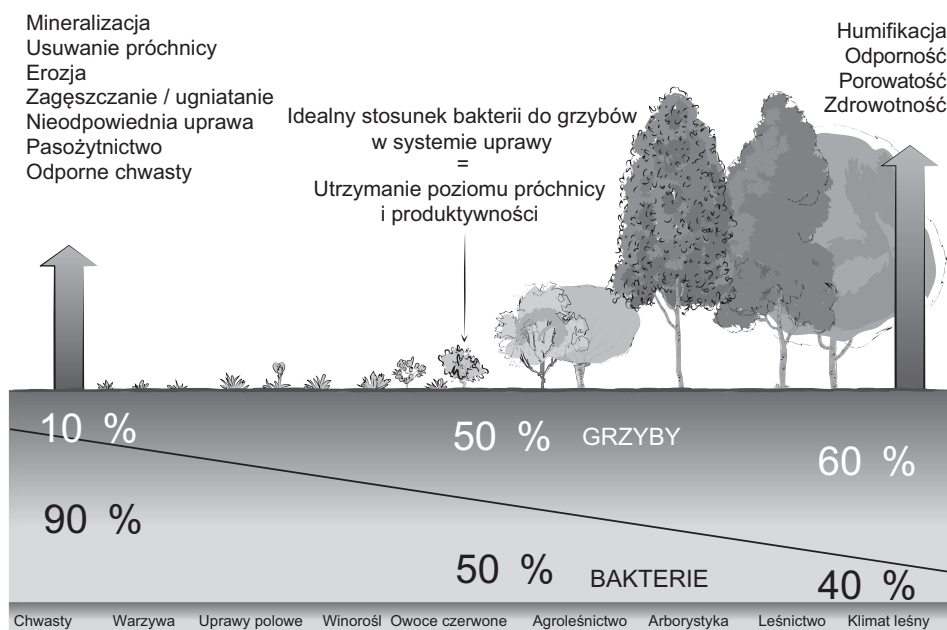
5.2.4 Decydujący jest stosunek bakterii do grzybów

Stosunek biomasy grzybów do bakterii (F:B, czyli Fungi:Bacteria) jest decydujący dla przemian glebowej materii organicznej (Johnson, 2015). Potwierdzają to liczne badania. Dr David Johnson z Uniwersytetu w Nowym Meksyku stwierdził, że stosunek F:B w glebach jest ważniejszym czynnikiem dla wzrostu roślin, niż ilość dostępnego azotu czy fosforu. Jego wnioski są takie, że profil mikrobiologiczny jest kluczowy dla sekwestracji węgla, jak również dla transferu składników odżywczych do roślin. Gleby uprawiane intensywnie często mają niższy stosunek biomasy F:B (stosunkowo mniej grzybów), niż gleby zarządzane bardziej ekstensywnie (patrz: Rysunek 5.4). Uważa się, że jest to spowodowane intensywnym mieszaniem gleby, dużą ilością nakładów chemii rolnej i niskim stosunkiem C:N materii organicznej wprowadzanej do gleby, co sprzyjającym bakteriom (Six *i in.*, 2006; Bailey *i in.*, 2002; Sinsabaugh *i in.*, 2013). Niższa biomasa grzybów została powiązana z wynikowo niższą zdolnością tych gleb



Rysunek 5.3 - Przepływ węglowodanów z liści do korzeni i odwrotnie

do sekwestracji węgla. Uważa się, że przesunięcie w kierunku dominacji grzybów, które mają wyższy stosunek C:N w społeczności mikrobiologicznej, skutkuje zwiększeniem efektywności wykorzystania węgla (Strickland i Rousk, 2010; Waring *i in.*, 2013). Eksperyment przeprowadzony na fizycznie i chemicznie identycznych glebach, ale z bardzo różnymi proporcjami grzybów do bakterii (Malik *i in.*, 2016), obejmował pomiar utraty węgla ^{13}C po zasianiu komosy piżmowej. Po miesiącu utrata węgla przez oddychanie mikroflory wynosiła 44% dla wariantu gleby zdominowanej przez grzyby, w porównaniu do utraty 65% dla części doświadczenia zdominowanej przez bakterie. Ilość węgla wbudowanego w materię organiczną gleby wynosiła 53% dla wariantu zdominowanego przez grzyby i 32% dla wariantu zdominowanego przez bakterie.



Rysunek 5.4 - Stosunek grzybów do bakterii w zależności od metody uprawy i pokrycia roślinnością

Oprócz tego, że grzyby są bardziej wydajne w budowaniu próchnicy w glebach, tworzą one substancje organiczne, które są również znacznie trwalsze. Okresy półtrwania substancji produkowanych przez grzyby są nieporównywalnie dłuższe, niż produkowanych przez bakterie: od 6 miesięcy do 3 lat dla produktów bakteryjnych i 20-50 lat lub więcej dla niektórych składników pochodzenia grzybowego (glomalina, melanina)! Ponadto, biorąc pod uwagę własny C:N tych organizmów widać, że grzyby są bardziej nastawione na magazynowanie węgla, niż bakterie. Bakterie natomiast, które mają niższy stosunek C:N, mają wyższe zapotrzebowanie na azot, aby zmagazynować tę samą ilość węgla.

Grzyby saprofityczne lepiej i dłużej wykorzystują pierwotną produkcję organiczną. Przy tej samej ilości materiału wytwarzają więcej próchnicy, niż

bakterie, a co ważniejsze - lepszej i bardziej zrównoważonej. Są więc one skutecznym narzędziem do trwałego magazynowania węgla w glebach.

Glomalina: ważny czynnik struktury gleby

Glomalina, glikoproteina produkowana przez grzyby mykoryzowe, ma silny wpływ na stabilność struktury poprzez agregację cząstek mineralnych i organicznych gleby, jednocześnie zwiększając potencjał wymienny kationów. W przeciwieństwie do wielu innych związków humusowych, cząsteczka ta jest bezpośrednio wytwarzana przez grzyba i pełni funkcję ochronną w ścianach strzępek grzyba przed atakiem bakterii. Oprócz właściwości hydrofobowych, cząsteczka ta wydaje się być silnie powiązana ze stabilnością strukturalną gleby i sekwestracją w niej węgla (Rillig *i in.*, 1999). Jak już wspomniano, zagęszczanie lub napowietrzanie gleby jest zasadniczym czynnikiem jej kontroli biologicznej i mikrobiologicznej. „W glebie korzenie i mikroby (zwłaszcza grzyby) są stolarzami, którzy budują i naprawiają dom, nieustannie produkując kleje (polisacharydy i glomalinę), które utrzymują wszystkie części razem” (Hoorman *i in.*, 2011).

5.2.5 Nadmiar azotu szkodzi grzybom

Badania wydają się z tym zgadzać. Duże ilości azotu, czy to w formie organicznej, czy mineralnej, sprzyjają bakteriom na niekorzyść grzybów. Wydaje się to całkiem logiczne biorąc pod uwagę ich wymagania (bakterie uzyskują więcej wartości z substancji bogatych w azot). Najbardziej wydajne grzyby w przemianach zdrewniałej materii organicznej to podstawczaki i wiele źródeł badawczych wspiera zdanie, że aby utrzymać aktywność lignolityczną grzybów nie jest konieczne dodawanie znaczących ilości azotu (Leatham & Kirk, 1983).

Ponadto, co zaskakujące i bardzo pozytywne, wyniki badań (Vries, 2009) pokazują, że po zmniejszeniu ilości stosowanego w nawozach azotu do punktu, w którym grzyby mogą w pełni odzyskać swoją niszę ekologiczną, współczynnik wykorzystania azotu przez rośliny ulega znacznej poprawie, a straty związane z jego wymywaniem są znacznie niższe. Niższe dawki azotu w okresie aktywności życiowej grzybów nie wpływają więc negatywnie na agrosystem. Osiągnięcie optimum biologicznego pozwala na utrzymanie plonów przy znacznej redukcji dawek azotu. Należy pamiętać, że wydajność azotu w systemach konwencjonalnych jest bardzo niska, wynosi jedynie około 35%.