

Anna Podleśna

*Instytut Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa - Państwowy Instytut Badawczy
w Puławach*

WPLYW NAWOZÓW SIARKOWYCH NA ZRÓŻNICOWANIE I AKTYWNOŚĆ MIKROORGANIZMÓW GLEBOWYCH*

Słowa kluczowe: nawozy siarkowe, bakterie, grzyby, promieniowce, enzymy

Wstęp

Celem rolniczej produkcji roślinnej jest uzyskanie wysokich plonów o pożądanej jakości. Jest ona prowadzona na glebie, która podlega wpływom klimatu, wegetacji roślinnej oraz oddziaływaniu człowieka (20). Gleba składa się z minerałów, martwej substancji organicznej, wody, powietrza oraz organizmów żywych. To powoduje, że jest to twór żywy, w którym zachodzą złożone przemiany chemiczne i biochemiczne, dzięki czemu stanowi naturalne siedlisko życia roślin. Gleby przeznaczone pod uprawę roślin powinny charakteryzować się odpowiednią żyznością, co odnosi się głównie do ich cech morfologiczno-fizycznych oraz właściwego uwilgotnienia, temperatury i odczynu, a także zasobności w składniki pokarmowe i materię organiczną. Jednak ciągle spotyka się niskie i niezbilansowane stosowanie składników pokarmowych, które degraduje jakość gleby i ma szkodliwy wpływ na jej biologiczne środowisko (10). Jednym ze składników wykazujących działanie plonotwórcze, który obok NPK powinien być uwzględniany w planie nawożenia, jest siarka. Niestety, w wielu rejonach Polski gleba wykazuje deficytową zawartość tego składnika. Rynek nawozowy oferuje obecnie wiele nawozów zawierających siarkę ale często różnią się one zarówno formą chemiczną tego składnika, jak i pierwiastkiem towarzyszącym, przez co ich wpływ na kształtowanie żyzności gleby może być odmienny, co wykazały badania Adams i in. (1). Wiadomo obecnie, że zmiany zachodzące w środowisku glebowym pod wpływem nawożenia oddziałują mniej lub bardziej korzystnie na poszczególne elementy żyzności, a niekiedy mogą nawet ją obniżyć, powodując w konsekwencji pogorszenie wielkości i jakości plonu. Jednym ze wskaźników żyzności oraz urodzajności gleb jest ocena ich aktywności mikrobiologicznej i enzymatycznej (16). Przyjmuje się, że zmiany

* Opracowanie wykonano w ramach zadania 2.2 w programie wieloletnim IUNG-PIB.

w liczebności oraz zróżnicowaniu mikroorganizmów glebowych mogą wpływać na procesy glebowe, które są kluczowymi w rolnictwie zrównoważonym, tj. recykling składników pokarmowych, utrzymanie struktury gleby, rozkład agrochemikaliów i zanieczyszczeń oraz kontrola szkodników roślin uprawnych.

Prezentowana praca przedstawia zagadnienie relacji pomiędzy stosowanymi nawozami siarkowymi a aktywnością mikroorganizmów i enzymów glebowych, opracowane w oparciu o dostępną literaturę przedmiotu.

Gleba jako środowisko życia mikroorganizmów

Gleba należy do najważniejszych i zarazem najbardziej skomplikowanych środowisk naturalnych, w którym rozwijają się mikroorganizmy. Stanowi ona środowisko biologiczne niejednorodne (heterogenne), w którym występują znaczne różnice w składzie i właściwościach, zależnie od miejsca, z którego pochodzi (23). Charakteryzuje ją struktura gruzełkowata, złożona z granul elementarnych o wymiarach od 0,5 do 5 mm, powstających z cząstek mineralnych, zlepionych przez substancje humusowe oraz śluz. Granule elementarne tworzą zaś większe agregaty, z kanalikami i otworami wypełnionymi roztworem glebowym i fazą gazową (15). Żyzność i potencjał plonotwórczy gleby są związane z jej właściwościami fizykochemicznymi oraz aktywnością biologiczną, czyli z intensywnością przebiegu procesów przemian substancji organicznych i mineralnych katalizowanych przez mikroorganizmy (7,14).

Glebę zasiedla ogromna liczba mikroorganizmów, które stanowią 0,2% jej ciężaru i 1,33% objętości. Biorąc pod uwagę profil glebowy to najwyższa liczebność mikroorganizmów jest obserwowana w warstwie od 0 do 15 cm, głównie ze względu na dostępność substancji pokarmowych i odpowiednie natlenienie. W 15-centymetrowej warstwie gleby znajduje się od 1,5 do 7,2 t·ha⁻¹ (średnio 4,2 t·ha⁻¹) biomasy mikroorganizmów (bakterii, grzybów, glonów, sinic oraz pierwotniaków). Natomiast w całej warstwie ornej gleby znajduje się 3-15 t·ha⁻¹ samych bakterii (7). Z kolei w 1 g gleby występuje od kilku tysięcy do kilku miliardów komórek bakterii. Biomasa grzybów najczęściej dwukrotnie przekracza biomasę bakterii. Są to na ogół grzyby saprofityczne czyli grzyby pobierające energię i rozwijające się na martwych szczątkach organizmów roślinnych i zwierzęcych, także na substancji organicznej, zsyntetyzowanej przez człowieka. Spełniają one podstawową funkcję w krążeniu pierwiastków w przyrodzie, rozkładając materię organiczną na związki proste (7). Mikroorganizmy są związane głównie z fazą stałą gleby, która umożliwia tworzenie się agregatów i jest bogatym źródłem energii oraz mikro- i makroelementów (15). Cząstki stałe gleby są zdolne do adsorbowania na swojej powierzchni zewnątrzkomórkowego DNA, uwolnionego podczas lizy komórek, który może stanowić dla mikroorganizmów glebowych źródło węgla, azotu czy fosforu (23). Prowadzone analizy rozkładu przestrzennego bakterii w mikrosiedliskach wykazały także, że w glebach poddawanych różnym praktykom nawożenia, więcej niż 80% bakterii jest ulokowanych w mikroporach fazy stałej gleby tzw. mikroagregatach (2-20 μm). Mikroorganizmy są adsorbowane na powierzchni

agregatów, bytują w substancjach humusowych, kompleksach organiczno-mineralnych i na częściowo rozłożonych cząstkach materii organicznej, tworząc mikrokolonie (15). Powstawanie agregatów glebowych umożliwia działanie mikroflory i korzeni roślin, wytwarzających włókna i nitki polisacharydowe, które łącząc się z cząstkami ilastymi tworzą kompleksy organiczno-mineralne (23). Stabilność tych agregatów jest ściśle uzależniona od aktywności mikroorganizmów glebowych. Takie miejsca oferują najbardziej korzystne warunki dla wzrostu mikroorganizmów w odniesieniu do wody, dostępności substratu, dyfuzji gazów i ochrony (22). Bogato zasiedlona przez mikroorganizmy jest strefa obejmująca powierzchnię korzenia i przylegającą do niego glebę zwaną ryzosferą (7). Różni się ona składem od innych części gleby, a jej grubość waha się od kilku do kilkunastu milimetrów, co zależy od rodzaju gleby, jej warunków fizykochemicznych, a przede wszystkim od gatunku i stadium rozwojowego rośliny. Ryzosfera stanowi specyficzne środowisko, w którym mają miejsce bardzo ważne i intensywne interakcje pomiędzy rośliną, glebą i mikroorganizmami (18). Bujne zasiedlanie ryzosfery przez mikroorganizmy jest spowodowane wydzielaniem przez rośliny licznych wydzielin korzeniowych, a także odbywający się proces złuszczenia oraz rozkładu komórek naskórka i czapeczek korzeniowych. Wydzieliny zawierają wiele związków organicznych takich jak: węglowodany, aminokwasy, cukry, kwasy organiczne, witaminy, alkaloidy czy związki taninowe sprzyjające rozwojowi bakterii. Związki te stanowią pożywienie dla mikroorganizmów (18). Dlatego liczebność mikroorganizmów w ryzosferze jest kilka-kilkadziesiąt razy większa niż w strefie poza korzeniem (7).

Znaczenie mikroorganizmów w funkcjonowaniu gleb

Mikroorganizmy są istotnym składnikiem każdego ekosystemu. Mają szczególne właściwości umożliwiające uczestnictwo w wielu naturalnych procesach zachodzących w przyrodzie (7). O ich przydatności decyduje szybkość przemiany materii oraz bogactwo i różnorodność przeprowadzanych procesów biochemicznych, a także duża zmienność fizjologiczna, umożliwiająca tworzenie szczepów o pożądanym właściwościach, lub szybkie dostosowywanie się do zmian w środowisku. Działalność drobnoustrojów w środowisku jest warunkiem podtrzymywania życia na Ziemi.

Gleba jest złożona z części mineralnych, organicznych i organizmów żywych. Zachodzi w niej wiele reakcji chemicznych i biochemicznych, określanymi jako metabolizm gleby. Ocenia się, że za przebieg tego metabolizmu w 80-90% są odpowiedzialne mikroorganizmy (7). Są one jednym z najistotniejszych czynników decydujących o żyzności i produktywności biologicznej gleb. Warunkują również obieg materii (cykliczne przechodzenie ze środowiska abiotycznego do organizmów żywych i znowu do środowiska abiotycznego itd.). Mikroorganizmy biorą udział w najważniejszych procesach biochemicznych odbywających się w glebie. Jednym z nich są przemiany węgla, przeprowadzane jako mineralizacja licznych, organicznych połączeń węgla, związków naturalnych i syntetycznych, do których należy przede

wszystkim rozkład celulozy i hemicelulozy, ligniny, pektyn, skrobi oraz tłuszczów i węglowodorów. Drugim ważnym procesem są przemiany azotu, w których mikroorganizmy uruchamiają w glebie dużą pulę tego składnika, obecną w formie substancji organicznej. Następnie należy wymienić przemiany: siarki, fosforu, potasu oraz żelaza i manganu. W efekcie tych procesów składniki pokarmowe, obecne w glebie w formach nieprzyswajalnych, zostają udostępnione do wykorzystania w procesach żywieniowych po utlenieniu lub/i mineralizacji przeprowadzanych przez bakterie i grzyby. Ponadto, mikroorganizmy biorą udział w procesach syntezy i rozkładu próchnicy glebowej, której obecność jest podstawowym warunkiem wysokiej żyzności gleby czyli zdolności gleby do zaspokajania pokarmowych i środowiskowych potrzeb roślin (7).

We wszystkich procesach biochemicznych związanych z przemianą związków organicznych i mineralnych główną rolę odgrywają enzymy mikroorganizmów. To od mikroorganizmów i wydzielanych przez nie enzymów zależy aktywność biologiczna gleby. Enzymy glebowe odgrywają ważną rolę zarówno w utrzymaniu właściwości fizycznych i chemicznych gleby oraz jej żyzności, jak również kondycji zdrowotnej. Pełnią kluczowe funkcje biochemiczne w procesach rozkładu materii organicznej i obiegu energii w środowisku glebowym. Są ważne jako katalizatory wielu reakcji życiowych koniecznych dla procesów mikrobiologicznych w glebach, takich jak: mineralizacja, immobilizacja, utlenianie, redukcja czy absorbowanie substancji nieorganicznych. Są także niezbędne dla stabilizacji struktury gleby, rozkładu zanieczyszczeń organicznych, tworzenia materii organicznej oraz krążenia składników pokarmowych (11) co powoduje, że odgrywają ważną rolę w rolnictwie (12). Enzymy są stale syntetyzowane, akumulowane i rozkładane w glebie a poziom aktywności enzymatycznej gleby jest podstawową informacją o zmianach zachodzących w środowisku (13).

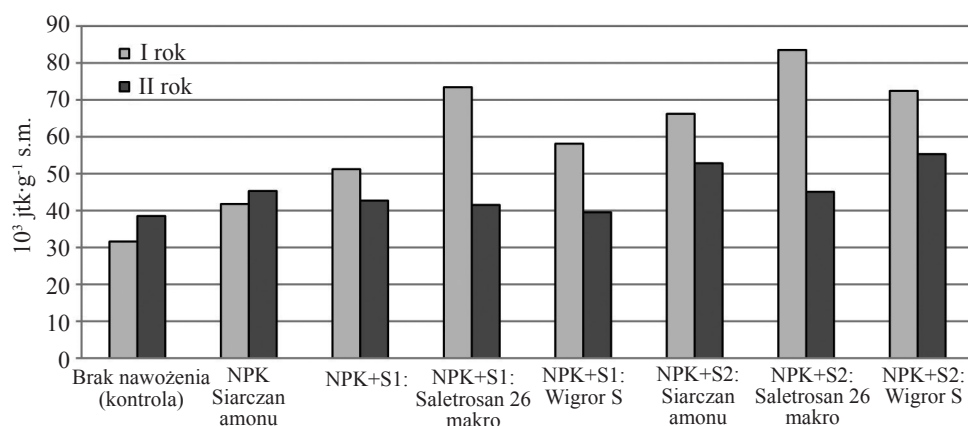
Wpływ nawozów siarkowych na rozwój i funkcjonowanie mikroorganizmów glebowych

Rozwój mikroorganizmów w glebie zależy od jej właściwości fizycznych i chemicznych, nawożenia, warunków klimatycznych oraz czynników agrochemicznych, a zwłaszcza od zasobności w materię organiczną, która jest dla nich źródłem energii i składników pokarmowych (17). Mikroorganizmy wraz z szatą roślinną określają zarówno kierunek, jak i charakter procesów biochemicznych oraz doprowadzają do powstania pewnego rodzaju równowagi w środowisku glebowym. W glebach uprawnych nie ma jednak naturalnej homeostazy, ponieważ podlegają one ciągłym zabiegom rolnika dążącego do uzyskania wysokich i dobrych jakościowo plonów. W tym celu stosowane są odpowiednie zabiegi uprawowe, nawożenie, ochrona chemiczna czy deszczowanie. Spośród wielu czynników antropogenicznych, mających duży wpływ na mikroorganizmy glebowe, jedno z głównych miejsc zajmuje nawożenie. W ostatnich latach w zaleceniach agrotechnicznych dużo uwagi poświęca

się wskazaniom dotyczącym stosowania nawozów siarkowych, aby zabezpieczyć glebę i uprawiane rośliny w ten cenny składnik pokarmowy.

W praktyce rolniczej często stosowane są siarczanowe formy nawozów tj. siarczan amonu, siarczan potasu oraz siarczan magnezu. Mysków i in. (14) prowadzili badania nad wpływem siarczanu amonu na aktywność biologiczną gleb i wykazali, że zastosowanie tego nawozu spowodowało silne zakwaszenie gleby. W konsekwencji wywołało to niekorzystne zmiany w proporcjach badanych zespołów mikroorganizmów powodując zwiększenie zespołu grzybów w stosunku do bakterii. Przytoczone wyniki potwierdzają zakwaszające działanie siarczanu amonu, który po rozpuszczeniu w wodzie glebowej dysocjuje na jony NH_4^+ i SO_4^{2-} . Z uwolnionych jonów rośliny szybciej, i w większej ilości, pobierają kationy NH_4^+ czemu towarzyszy wydzielanie do gleby równoważnej ilości jonów H^+ . Również w doświadczeniu Filipek-Mazur i in. (3) prowadzonym z różnymi nawozami siarkowymi, na tle kontroli i nawożenia podstawowego NPK, wykazano pewien wpływ siarczanu amonu na liczebność grzybów w glebie. Obserwowano jednocześnie znaczne różnice w zależności od nawożenia oraz uprawianej rośliny (Rys. 1). Wyższą liczebność grzybów glebowych stwierdzono po zbiorze rzepaku jarego (I rok badań), szczególnie w obiektach, gdzie stosowano nawóz Saletrosan 26 makro, Wigor S oraz siarczan amonu w większej dawce. Z kolei w drugim roku badań największa liczebność grzybów wystąpiła w glebie nawożonej wyższą dawką siarczanu amonu i siarki elementarnej (Wigor S), co jest prawdopodobnie związane ze spadkiem odczynu gleby w tych obiektach (5, 19) i wzrostem ciśnienia osmotycznego (5).

Zdaniem Smyka i in. (21) silny rozwój grzybów w glebach zakwaszonych jest zjawiskiem niekorzystnym, gdyż wiele ich gatunków charakteryzuje się właściwościami toksycznymi (*Aspergillus*, *Fusarium* i *Penicillium*), ponieważ ich



Rys. 1. Liczebność grzybów w glebie w zależności od nawożenia

Źródło: Filipek-Mazur i in., 2017 (3)

metabolity odznaczają się szkodliwym wpływem na mikroorganizmy. Niektóre mykotoksyny wykazują działanie bakteriobójcze, przez co niszczą m.in. symbiotyczne i niesymbiotyczne asymilatory azotu atmosferycznego (17). Innego zdania jest Martyniuk (12), który twierdzi, że zastosowanie siarczanu amonu obniżyło pH gleby i zmniejszyło liczebność bakterii, ale gleba ta nie była pod żadnym względem jałowa (Tab.1). Wciąż zawierała bardzo dużo różnych bakterii, a liczebność zasiedlających ją grzybów była nawet wyższa niż w glebie nienawozonej lub nawozonej obornikiem. Według tego autora (12), grzyby są pożytecznymi mikroorganizmami glebowymi, które w zdecydowanej większości nie są szkodliwe dla roślin i pełnią w glebie wiele ważnych funkcji. Zalicza się do nich produkcję prekursorów związków humusowych i substancji biologicznie aktywnych czy rozkład resztek organicznych, zwłaszcza zawartych w nich złożonych polimerów, tj. celuloza, lignina, keratyna i chityna. Ponadto grzyby wytwarzają duże ilości antybiotyków, substancji humusowych, witamin oraz mykotoksyn. Poprzez wytwarzanie substancji odżywczych, akumulację wody, wytwarzanie kwasów organicznych i uwalnianie pierwiastków ze związków mineralnych mają duże znaczenie w procesach glebotwórczych i odżywianiu roślin.

Tabela 1

Wpływ nawożenia na niektóre mikrobiologiczne i chemiczne właściwości gleby

Obiekty	pH _{H₂O}	Liczebność		Zawartość C organicznego (mg·kg s.m. gleby ⁻¹)	Aktywność dehydrogenaz (μg formazanu·g gleby ⁻¹)
		bakterii (jtk·10 ⁶ ·g gleby ⁻¹)	grzybów (jtk·10 ³ ·g gleby ⁻¹)		
Bez nawożenia	6,2	7,0	76	4,7	177
NPK, N w (NH ₄) ₂ SO ₄	4,4	2,3	220	4,5	44
NPK, N w NH ₄ NO ₃	6,9	7,6	72	5,6	231
Obornik, 20 t·ha ⁻¹	6,8	18,5	120	6,1	242

Źródło: Martyniuk, 2014 (12), zmodyfikowane

Wytwarzają również substancje czynne – gibereliny, auksyny, cytokiny. Z kolei w doświadczeniu wazonowym Kulczycki i in. (8) stwierdzono wyraźny spadek liczebności grzybów w glebie nawozonej siarczanem wapnia, w stosunku do gleby nawozonej siarką elementarną. W glebie z tego obiektu zmniejszyła się również liczba wyosobnionych gatunków. Zdaniem autorów ww. pracy negatywny wpływ łatwo przyswajalnej dla grzybów siarki siarczanowej mógł być spowodowany nadmierną akumulacją tego składnika w strzępkach grzybni lub też toksycznym oddziaływaniem siarki na grzybnie przy jednorazowym wprowadzeniu do gleby całej dawki nawozu. Wynika to z tego, iż siarczany są dostępne dla roślin i mikroorganizmów bezpośrednio po aplikacji, podczas gdy siarka elementarna musi ulec utlenieniu do siarczanów (9).

W doświadczeniu Lupwayi i in. (9) istotny wpływ siarki na zróżnicowanie mikroorganizmów obserwowano w całej glebie (wpływ negatywny w porównaniu z kontrolą) i w ryzosferze (efekt pozytywny). Jej podanie w postaci siarczanu miało większy wpływ (negatywny bądź pozytywny) na zróżnicowanie mikroorganizmów niż siarki elementarnej. Na podstawie badań stwierdzono, że stosowanie siarki

może mieć bezpośredni szkodliwy wpływ na mikroorganizmy, bądź pośrednio wpływ korzystny, poprzez oddziaływanie na wzrost roślin, który powoduje zwiększenie wydzielin korzeniowych w ryzosferze zdrowych roślin. Wyniki badań Gajewskiej i in. (4) podkreślają istotny wpływ nawożenia na liczebność i skład gatunkowy mikroorganizmów glebowych (Tab. 2). Zastosowanie superfosfatu pojedynczego (zawierającego ok. 28% SO₃) spowodowało, w porównaniu do superfosfatu potrójnego (zawierającego śladowe ilości siarki), a szczególnie do kontroli, wzrost liczby gatunków bakterii i grzybów w glebie. Jednocześnie w glebie z tego obiektu stwierdzono mniejszą liczebność bakterii i grzybów niż w glebie nawożonej superfosfatem potrójnym. Zdaniem Lupay i in. (9) wpływ siarki na poszerzenie zróżnicowania mikrobiologicznego jest obserwowany zwłaszcza w glebach bardziej deficytowych w ten składnik.

Tabela 2

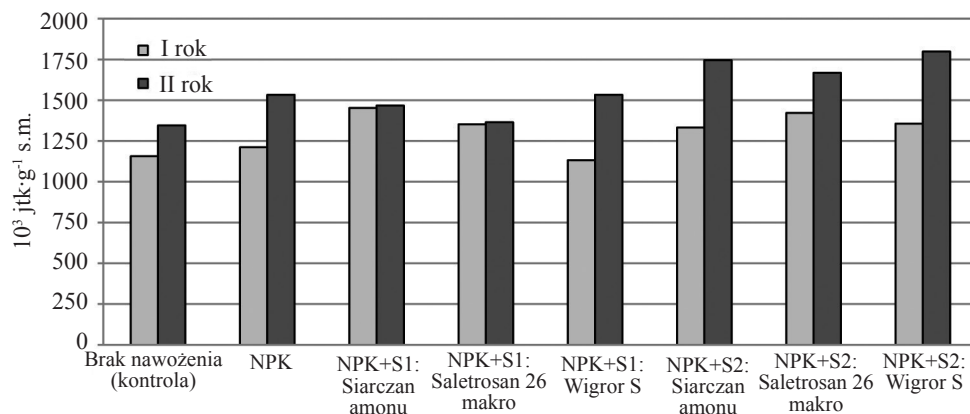
Skład gatunkowy i liczebność mikroorganizmów w glebie w zależności od nawożenia

Kombinacja nawozowa	Bakterie	Grzyby
Skład gatunkowy		
Kontrola	<i>Thiobacillus spp.</i>	<i>Aspergillus nidulans</i> <i>Penicillium jonthinellum</i> <i>Penicillium notatum</i> <i>Penicillium thomii</i> Drożdże nieoznaczone
Superfosfat pojedynczy	<i>Thiovulum sp.</i> <i>Achromatium sp.</i> <i>Thiobacillus thiooxidans</i> <i>Macromonas sp.</i>	<i>Acremoniu, murorum</i> <i>Aspergillus fumigatus</i> <i>Aspergillus repens</i> <i>Mucor hiemalis</i> <i>Mucor spinosus</i> Drożdże nieoznaczone
Superfosfat potrójny	<i>Thiovulum sp.</i> <i>Macromonas sp.</i> <i>Thiobacillus spp.</i>	<i>Acremonium scritum</i> Drożdże nieoznaczone
Ogólna liczebność mikroorganizmów (log ⁻¹ · jtkg ⁻¹ · s.m. ⁻¹)		
Kontrola	4,71	3,20
Superfosfat pojedynczy	4,59	2,33
Superfosfat potrójny	5,40	3,17

Źródło: Gajewska i in., 2005 (4), zmodyfikowane

Również badania Filipk-Mazur i in. (3) wykazały, że nawozy siarkowe stosowane na glebę lekko kwaśną (pH 5,96), miały korzystny wpływ na liczebność bakterii glebowych (Rys. 2). Po pierwszym roku badań największą liczebność tych mikroorganizmów (od 23 do 26% więcej niż w glebie kontrolnej) stwierdzono w glebie nawożonej pojedynczą dawką siarczanu amonu i podwójną Saletrosanu 26 makro. Natomiast po roku drugim najwięcej bakterii miały gleby nawożone podwójnymi dawkami nawozów zawierających siarkę w formie elementarnej i siarczanowej.

Przedstawione wyniki świadczą o bardzo korzystnym działaniu siarki nawozowej. Może to wskazywać na dodatni wpływ uzupełnienia jej ilości w glebie doświadczalnej, która charakteryzowała się wyjściowo niską zasobnością w ten składnik. Jak wiadomo, wszystkie bakterie wymagają wody i składników pokarmowych. Siarka jest na ogół przyswajana w postaci jonu siarczanowego, ale niektóre bakterie wymagają jej zredukowanych połączeń jak siarczany (IV), tiosiarczany lub połączenia organiczne, tj. cysteina lub metionina (7). Jednak wyższa liczebność bakterii w glebie obiektu kontrolnego i nawożonego NPK, w II roku badań może świadczyć także o pojawieniu się w tym czasie innych czynników, tj. dostępność wody i odpowiednia temperatura, które sprzyjały mineralizacji materii organicznej i namnażaniu się bakterii. Korzystny wpływ wzrostu liczebności bakterii w glebie wynika z tego, że wywołują one różne procesy biochemiczne, w tym rozkładają celulozę i ligniny do cukrów prostych. Szczególnie duże znaczenie dla żyzności gleb mają bakterie wiążące azot, jak *Rhizobium* oraz *Azotobacter* i *Clostridium*.



Rys. 2. Liczebność bakterii w glebie w zależności od nawożenia

Źródło: Filipek-Mazur i in., 2017 (3), zmodyfikowane

Zastosowane nawożenie spowodowało również wzrost liczebności promieniowców, zaliczanych obecnie do bakterii. Obserwowano to szczególnie w glebach gdzie stosowano wyższe dawki siarki w postaci siarczanu amonu, Saletrosanu 26 makro i nawozu Wigror S. Świadczy to o poprawie właściwości gleby, ponieważ promieniowce stanowią ważną grupę mikroorganizmów glebowych. Są one niezbędne w procesach rozkładu materii organicznej, aminokwasów, polisacharydów, tłuszczów, połączeń humusowych i węglowodorów alifatycznych a także błonnika, pentozanów i ligniny. Promieniowce wytwarzają również antybiotyki, barwniki i witaminy, które spełniają ważne funkcje w regulacji procesów przebiegających w środowisku glebowym (7).

Pozytywny, i stały w okresie wegetacji, wpływ siarki na liczebność bakterii i grzybów wykazano także w badaniach wazonowych prowadzonych na glebie o pH 7,5 (25). Najwyższy wzrost wymienionych mikroorganizmów obserwowano w glebie nawożonej niższą dawką siarki (30 mg S·kg⁻¹ gleby) co wskazuje, że dawka

podwojona była prawdopodobnie już za wysoka i oddziaływała na nie ograniczająco. Przebieg dynamiki liczebności bakterii i grzybów potwierdza, że najmniejszą ich liczebność stwierdzono w fazie wypełniania strąków, a najwyższą – w dojrzałości pełnej soi. Natomiast promieniowce rozwijały się najlepiej w początkowym okresie wzrostu soi do fazy pełni kwitnienia, a następnie ich liczebność w glebie uległa nieznacznemu zmniejszeniu. Wyjaśnieniem tej korzystnej reakcji mikroorganizmów na nawożenie siarką jest informacja o niskiej zasobności gleby w ten składnik pokarmowy. To potwierdza niezbędność siarki w żywieniu wszystkich organizmów. Rośliny odpowiednio zaopatrzone w siarkę mają prawidłowy metabolizm, który warunkuje sprawny wzrost i rozwój części nadziemnych oraz korzeni, przez co korzenie wydzielają więcej związków chemicznych i umożliwiają rozwój mikroorganizmów. Jak wspomniano wcześniej, mikroorganizmy glebowe także potrzebują siarki jako składnika pokarmowego, który jest dla nich nie tylko źródłem energii, ale także dostarcza materiału do rekonstrukcji komórek, wzrostu i rozmnażania (7).

Nawozy siarkowe a enzymy

Mikroorganizmy wydzielają do gleby bardzo dużo różnych enzymów (20), które określają zachodzące w nich procesy metaboliczne. Procesy te zależą z kolei od fizycznych, chemicznych, biochemicznych i mikrobiologicznych właściwości gleby (2). Poziom enzymów w glebie różni się ze względu na fakt, iż każda gleba ma różną zawartość materii organicznej, inny skład i aktywność mikroorganizmów, a także ze względu na inną intensywność przebiegających w niej procesów biologicznych.

Badania prowadzone przez Filipk-Mazur i n. (3) nad wpływem nawozów siarkowych na aktywność enzymatyczną gleby dały zróżnicowane wyniki (Tab. 3). Po pierwszym roku badań nie obserwowano statystycznie istotnego wpływu nawożenia na aktywność dehydrogenaz i katalazy. Po drugim roku badań aktywność dehydrogenaz w glebie nawożonej NPK była o 18% niższa w porównaniu do kontroli. Pewien trend wzrostu aktywności tego enzymu obserwowano szczególnie w glebach nawożonych NPK wraz z wszystkimi nawozami siarkowymi podanymi w większej dawce. Najkorzystniej wypadł jednak nawóz Wigor S.

Tabela 3

Aktywność dehydrogenaz ($\mu\text{g TPF}\cdot\text{kg}^{-1}\text{ s.m.}\cdot\text{h}^{-1}$), katalazy ($\mu\text{mol H}_2\text{O}_2\cdot\text{g}^{-1}\text{ s.m.}\cdot\text{min}^{-1}$) i arylosulfatazy ($\mu\text{g pNF}\cdot\text{g}^{-1}\text{ s.m.}\cdot\text{h}^{-1}$) w glebie

Obiekt	Aktywność dehydrogenaz		Aktywność katalazy		Aktywność arylosulfatazy	
	I rok	II rok	I rok	II rok	I rok	II rok
Brak nawożenia (kontrola)	57,2a*	61,9b	8,15a	6,54b	21,9c	25,3b
NPK	68,7a	50,6a	7,57a	5,97ab	18,0b	20,8ab
NPK + S1 (siarczan amonu)	53,9a	62,6b	6,67a	5,76a	13,6a	20,0a
NPK + S1 (Saletrosan 26 makro)	64,6a	59,7b	7,46a	6,27ab	19,0bc	20,9ab
NPK + S1 (Wigor S)	59,2a	67,5b	7,73a	5,90ab	18,6b	21,1ab
NPK + S2 (siarczan amonu)	52,7a	62,4b	6,85a	5,93ab	12,5a	19,1a
NPK + S2 (Saletrosan 26 makro)	61,0a	65,2b	7,93a	5,73a	20,1bc	21,6ab
NPK + S2 (Wigor S)	52,0a	66,8b	6,92a	5,77a	15,0a	22,3ab

*Wartości średnie w kolumnach oznaczone tymi samymi literami nie różnią się istotnie przy poziomie istotności $\alpha \leq 0,05$, według testu Duncana

Źródło: Filiation-Mazur i in., 2017 (3), zmodyfikowane

Najwyższą aktywność katalazy i arylosulfatazy wykazywała gleba obiektów kontrolnych, a nawożenie NPK oraz dodatek nawozów siarkowych powodowały obniżenie aktywności tych enzymów. Enzym arylosulfataza jest odpowiedzialny za hydrolizę (rozkład) estrów siarczanowych i jest wydzielany przez bakterie w odpowiedzi na deficyt siarki w glebie, co wskazuje, że uzyskane wyniki są zgodne z literaturą przedmiotu (2, 11). Natomiast wzrost aktywności katalazy o 3,8-8,8 oraz 0,4-5,0%, odpowiednio dla niższej (30 mg S·kg⁻¹ gleby) i wyższej (60 mg S·kg⁻¹ gleby) dawki siarki w doświadczeniu wazonowym uzyskali Zhao i in. (25). Przedstawione wyniki wskazują, że zaopatrzenie w siarkę może zwiększyć aktywność katalazy w glebie. Aktywności tego enzymu jest ważnym wskaźnikiem świadczącym o intensywności procesów biochemicznych w glebie. Podobny trend wzrostu aktywności uzyskano w przypadku inwertazy, która w porównaniu do kontroli wzrosła o 0,9-3,6% i 0,4-1,3%, odpowiednio dla niższej i wyższej dawki siarki. Jednocześnie nie stwierdzono istotnej różnicy pomiędzy dawkami siarki i kontrolą, w której nie stosowano siarki. Prawdopodobnie wynikało to z faktu, że enzym inwertaza (zwany też sacharazą) należy do białek stabilnych w pH od 4 do nawet 10 (6) a zatem ewentualne obniżenie odczynu gleby w efekcie zastosowania siarki nie miało wpływu na jego aktywność. Ze względu na to, że inwertaza jest enzymem odszczepiającym cząsteczki fruktozy od sacharydów, we wspomnianym eksperymencie wykazano korzystny wpływ siarki na rozkład węglowodanów w glebie.

Znacznie większe obniżenie aktywności enzymów glebowych w efekcie zastosowania siarki elementarnej stwierdzili Wysocka i in. (24). Każda kolejna dawka siarki (1-5 g·dm⁻³gleby) powodowała dalszy spadek aktywności wszystkich badanych enzymów, a dodatkowo obserwowano także systematyczne

obniżanie odczynu gleby. Jeden z badanych enzymów – ureaza – katalizuje hydrolizę mocznika w glebie (13). Szybkość rozkładu mocznika zależy od odczynu gleby, a optymalna wartość pH wynosi od 6 do 7. Natomiast przy małej wartości odczynu bakterie mocznikowe rozwijają się w znikomych ilościach lub prawie wcale. Ponadto Gupta i in. (5) stwierdzili, że siarka utlenia się szybciej w glebach zasobnych w biomasę, co powoduje większe obniżenie odczynu i przez to ma bardziej istotny wpływ na środowisko glebowe. Prawdopodobnie również z tego powodu znacznemu obniżeniu uległa aktywność fosfataz, które katalizują hydrolizę organicznych połączeń fosforu i odpowiadają za gospodarkę fosforem w roślinie (13). W warunkach znacznego zakwaszenia gleby wzrasta także przyswajalność metali ciężkich, które powodują spadek aktywności fosfataz. Szczególną wrażliwość na działanie metali ciężkich wykazują również dehydrogenazy rozkładające związki organiczne w glebie, a procesy te są częścią szlaku oddechowego mikroorganizmów glebowych (2). Zdaniem Wyszko w s k i e j i n. (24) siarka elementarna ma szczególnie wpływ na zakwaszenie środowiska, które wpływa niekorzystnie na dehydrogenazy, ureazę, alkaliczną fosfatazę, a nawet na fosfatazę kwaśną. Zakwaszające działanie siarki elementarnej wynika z tego, że jej utlenianie powoduje zwiększenie stężenia jonów H^+ w glebie. Jednostka masowa tej formy siarki wywołuje efekt zakwaszający, który do neutralizowania wymaga 3 jednostek wapnia. Negatywne, w stosunku do enzymów glebowych, działanie siarki pierwiastkowej ma także związek z przedłużającym się procesem jej powolnego utleniania, co powoduje, że działanie zakwaszające trwa dłużej i zwiększa się wraz z upływem czasu (19).

Podsumowanie

Mikroorganizmy glebowe odgrywają niezwykle ważną rolę w przemianach składników pokarmowych w glebie mających znaczenie żywieniowe dla roślin uprawnych. Stąd też znajomość ich liczebności, zróżnicowania gatunkowego i działalności w tym środowisku jest niezbędna do zapewnienia optymalnych warunków dobrego wzrostu i rozwoju roślin oraz ich plonowania. Współdziałanie mikroorganizmów i roślin wyższych prowadzi do powstania pewnego rodzaju równowagi w układach biocenotycznych środowisk glebowych. Jednak równowaga ta może być zakłócona przez każdy nowy dopływ substancji chemicznej lub przez nagłą zmianę właściwości fizycznochemicznych gleby spowodowaną między innymi przez nawożenie. Może to doprowadzić do obniżenia żyzności gleby, co ma negatywny wpływ na wzrost i rozwój roślin uprawnych oraz skutkuje obniżeniem wielkości i jakości plonu. Jak wykazano w niniejszej pracy, stosowanie nawozów siarkowych może także powodować zmiany w różnorodności i aktywności mikroorganizmów glebowych, jak również wydzielanych przez nie enzymów.

Literatura

1. Adamus M., Drozd J., Stanisławska E.: Wpływ zróżnicowanego nawożenia organicznego i mineralnego na niektóre elementy żyzności gleby. *Rocz. Gleb.*, 1989, **XL**, **1**: 101-110.
2. Das S.K., Varma A.: Role of enzymes in maintaing soil helth. In: *Soil enzymology*, Soil biology 22, G. Shukla and A.Varma (Eds.), Berlin, 2011: 25-42.
3. Filipek Mazur B., Gorczyca O., Tabak M.: The effect of sulphur –containing fertilizers on soil biological properties. *Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie*, 2017(IV-VI), **T.17,Z 2(58)**: 69-81.
4. Gajewska J., Olejnik K., Parzydeł M., Rastawicka M., Miszczyk A., Szulc W.: Wpływ różnych systemów nawozowych na mikroflorę glebową ze szczególnym uwzględnieniem tlenowych bakterii siarkowych. *Fragm. Agron.*, 2005(XXII), **1(85)**: 61-71.
5. Gupta V.S.S.R., Lawrence J.R., Germida J.J.: Impact of elemental sulfur fertilization on agricultural soils. I. Effects on microbial biomass and enzyme activities. *Can. J. Soil Sci.*, 1988, **68**: 463-473.
6. Jędrzejczak-Krzepkowska M., Kalinowska H., Bielecki S.: β -fruktofuranazydaza – właściwości, struktura i zastosowanie. *Post. Bioch.*, 2011, **57(4)**: 401-410.
7. Kwaśna H.: *Mikrobiologia rolnicza*. Wyd. Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu, 2014, s. 390.
8. Kulczycki G., Płaskowska E., Matkowski K., Moszczyńska E.: Wpływ nawożenia siarką siarczanową i elementarną na liczebność i skład gatunkowy zbiorowisk grzybów w glebie. *Zesz. Probl. Post. Nauk Rol.*, 2007, **520**: 525-530.
9. Lupwayi N.Z., Monreal M.A., Clayton G.W., Grant C.A., Johnston A.M., Rice W.A.: Soil microbial biomass and diversity respond to tillage and sulphur fertilizers. *Can. J. Soil Sci.* 2001, **81**: 577-589.
10. Mahajan S., Kanwar S.S., Kumari P., Sharma S.P.: Long-term effect of mineral fertilization and amendments on microbial dynamics an as alfisol of western Himalayas. *Indian J. Microb.*, 2007, **47**: 8689.
11. Makoi J.H.J.R., Ndakidemi P.A.: Selected soil enzymes: Examples of their potential roles in the ecosystem. *African J. Biotechnol.*, 2008, **7(3)**: 181-191.
12. Martyniuk S.: Czy rolnictwo konwencjonalne (intensywne) szkodzi mikroorganizmom glebowym? *Pol. J. Agron.*, 2014, **17**: 25-29.
13. Mocek-Płóćiniak A.: Wpływ metali ciężkich na mikroorganizmy oraz aktywność enzymatyczną gleby. *Rocz. Gleb.*, 2011, **LXII**, **4**: 211-220.
14. Myśków W., Stachyra A., Zięba S., Masiak D.: Aktywność biologiczna gleby jako wskaźnik jej żyzności i urodzajności. *Rocz. Gleb.*, 1996, **VII**, **1-2**: 89-99.
15. Nannipieri P., Ascher J., Ceccherini M.T., Landi L., Pietramellara G., Renella G.: Microbial diversity and soil functions. *Europ. J. Soil Sci.*, 2003, **54**: 655-670.
16. Natywa M., Sawicka A., Wolna-Maruwka A.: Aktywność mikrobiologiczna i enzymatyczna gleby pod uprawą kukurydzy w zależności od zróżnicowanego nawożenia azotem. *Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie*, 2010, **10**, **2(30)**: 111-120.
17. Natywa M., Selwet M., Maciejewski T.: Wpływ czynników agrotechnicznych na liczebność i aktywność drobnoustrojów glebowych. *Fragm. Agron.*, 2014, **31(2)**: 56-63.
18. Nihirimbere V., Ognema M., Smargiassi M., Thonart P.: Beneficial effect of the rhizosphere microbial community for plant growth and health. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ* 2011, **15(2)**: 327-337.
19. Podleśna A.: Wpływ nawozów siarkowych na odczyn i zasobność gleb w składniki pokarmowe. *Studia i Raporty IUNG-PIB*, 2015, **45(19)**: 97-112.
20. Russel S.: Znaczenie badań enzymów w środowisku glebowym. *Acta Agroph.*, *Rozprawy i Monografie*, 2005, **(3)**: 5-9.
21. Smyk B., Czachor M., Awiz N.H.: Występowanie grzybów toksynotwórczych w glebach i ich wpływ na produktywność biologiczną agrosystemów. *Zesz Probl. Post. Nauk Roln.*, 1989, **380**: 143-150.

-
22. Torsvik V., Ovreas L.: Microbial diversity and function in soil: from genes to ecosystems. *Curr. Opin. in Microb.*, 2002, **5**: 240-245.
 23. Wolińska A.: Aktywność dehydrogenazowa mikroorganizmów glebowych i dostępność tlenu w procesie reoksydacji wybranych mineralnych gleb Polski. *Acta Agroph., Rozprawy i Monografie*, 2010, **180**, ss. 88.
 24. Wyszowska J., Kucharski J., Benedycka Z.: Physicochemical properties and enzymatic activity of sulfur-acidified horticultural soil. *Pol. J. Environ. Studies*, 2001, **10(4)**: 293-296.
 25. Zhao Y., Xiao X., Bi D., Hu F.: Effects of sulfur fertilization on soybean root and leaf traits, and soil microbial activity. *J. Plant Nutr.*, 2008, **31**: 473-483.
-

Adres do korespondencji:

*dr hab. Anna Podleśna, prof. nadzw.
Zakład Żywienia Roślin i Nawożenia
IUNG-PIB
ul. Czartoryskich 8, 24-100 Puławy
tel. 81 4786 835
e-mail: ap@iung.pulawy.pl*

