

Received: 15.07.2025 / Accepted: 06.08.2025

ARTYKUŁ PRZEGLĄDOWY

Mikroorganizmy jako narzędzie rewitalizacji gleb w środowisku miejskim

Microorganisms as a tool for soil revitalization in urban environment

Wiktoria Szczygieł, Katarzyna Patejuk* 

Streszczenie

Gleby antropogeniczne cechuje nieregularna miąższość i brak wykształconych poziomów genetycznych. Urbanizacja modyfikuje ich strukturę, skład mikrobiologiczny i makrofaunę, a ugniatanie, metale ciężkie, nieregularne dostawy materii organicznej i efekt miejskiej wyspy ciepła zmieniają także ich mikrobiom. W glebach zurbanizowanych spada liczba grzybów mikoryzowych, dominują zaś Proteobacteria, Actinobacteria, Firmicutes i Bacteroidetes. Coraz większe znaczenie ma rewitalizacja i przywracanie naturalnego mikrobiomu glebom antropogenicznym. Na rynku dostępne są preparaty mikrobiologiczne m.in. grzyby z rodzaju *Glomus* i *Trichoderma* oraz bakterie *Bacillus* i *Streptomyces*, które według badań poprawiają właściwości gleby, wspomagają odżywianie roślin, zwiększają ich odporność na stres i patogeny oraz poprawiają strukturę podłoża. W artykule przedstawiono rolę mikroorganizmów w rewitalizacji gleb miejskich oraz przegląd komercyjnych preparatów dostępnych w Polsce.

Słowa kluczowe: mikroorganizmy, rewitalizacja gleby, gleby miejskie, mikrobiom, mykoryza, *Bacillus*

Abstract

Anthropogenic soils exhibit irregular thickness and lack well-defined genetic horizons. Urbanization alters their structure, microbiological composition, and macrofauna, and compaction, heavy-metal contamination, uneven organic-matter inputs, and the urban-heat-island effect all reshape their microbiome. In such soils, mycorrhizal fungi decline while Proteobacteria, Actinobacteria, Firmicutes, and Bacteroidetes prevail. Restoring the natural microbiome of urban soils is gaining importance. Commercial microbial formulations featuring fungi such as *Glomus* and *Trichoderma* and bacteria like *Bacillus* and *Streptomyces* have been shown to enhance soil properties, support plant nutrition, bolster stress and pathogen resistance, and improve substrate structure. The article presents the role of microorganisms in the revitalization of urban soils and an overview of commercial preparations available in Poland.

Keywords: microorganisms, soil revitalization, urban soils, microbiome, mycorrhiza, *Bacillus*

Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu
pl. Grunwaldzki 24a, 50-363 Wrocław

*corresponding author: katarzyna.patejuk@upwr.edu.pl

Wstęp / Introduction

Współczesny rozwój technologii i dynamiczny tryb życia doprowadziły do wzrostu liczby ludności w miastach oraz intensywnej rozbudowy terenów zurbanizowanych. Szybka ekspansja zabudowy prowadzi do nieodwracalnych zmian w strukturze gleby, jej morfologii oraz składu mikro- i makroflory oraz fauny glebowej. Aby ograniczyć negatywne skutki urbanizacji i degradacji gleby, niezbędna jest odpowiednia rewitalizacja. Jest to kompleksowy i zintegrowany proces odnowy obszarów zdegradowanych, realizowany przy współpracy władz samorządowych, społeczności lokalnej oraz innych interesariuszy (Strzelecka 2011). Dzięki odpowiednio zaplanowanej rewitalizacji możliwe jest nie tylko przywrócenie zdegradowanym terenom ich pierwotnych funkcji, ale także stworzenie zdrowszego, bardziej zrównoważonego środowiska dla przyszłych pokoleń. Troska o stan gleby, jej bioróżnorodność oraz zdolność do akumulacji składników odżywczych powinna stanowić fundament działań urbanizacyjnych i ekologicznych. Właściwe zarządzanie przestrzenią miejską pozwala nie tylko na harmonijne współistnienie infrastruktury i przyrody, lecz także na budowanie trwałych, odpornych na zmiany ekosystemów, które będą służyć ludziom i naturze przez długie lata.

W artykule przedstawiono rolę mikroorganizmów w rewitalizacji gleb miejskich oraz przegląd komercyjnych preparatów dostępnych w Polsce.

Antropogeniczna degradacja gleb / Anthropogenic soil degradation

Degradacja gleb, zwana również inaczej denudacją, to powszechny proces obejmujący zarówno nasilenie naturalnych zjawisk geomorfologicznych pod wpływem działalności człowieka (np. splukiwania, splęzywania, soliflukcji), jak i procesy wynikające wyłącznie z ingerencji ludzkiej, które nie występują w środowisku naturalnym (np. przemieszczanie gleby przez maszyny rolnicze, erozja wietrzna czy wodna, splukiwanie wodami z deszczowni czy wynoszenie cząstek gleby wraz z plonami). Efektem tych procesów jest stopniowe zmniejszanie miąższości gleb na wypukłych formach terenu, prowadzące do odsłaniania skały macierzystej, a także akumulacja przemieszczonego materiału w obniżeniach i u podnóży stoków (Świtoniak i wsp. 2012).

Degradacja gleb powoduje często powstanie niekoniernych zdrowych i unikalnych typów gleb. Gleby antropogeniczne to specyficzna grupa gleb, których powstanie i rozwój są bezpośrednio związane z działalnością człowieka. Charakteryzują się one zróżnicowaną miąższością, a niekiedy brakiem typowych poziomów genetycznych, co wynika z wieloletniego wzbogacania ich w różnorodne materiały, takie jak odpady organiczne, komposty czy inne substancje pochodzenia ludzkiego. Działania te prowadzą

do istotnych zmian w strukturze, właściwościach chemicznych i biologicznych tych gleb. W ich przypadku proces kształtowania profilu glebowego jest w dużej mierze uzależniony od skali i charakteru ingerencji człowieka (Systematyka gleb Polski 2019).

Wpływ typu gleby na jej życie biologiczne / The influence of soil type on its biological life

Długotrwała, rosnąca antropogenizacja znacząco wpływa na mikrobiom glebowy, jednak jest to zależne od rodzaju gleby i jej właściwości fizykochemicznych. Kluczowym czynnikiem kształtującym strukturę mikroorganizmów w glebie jest jej odczyn. Można wyznaczyć, iż w glebach o pH poniżej 5,5 nie występują bakterie z rodzaju *Azotobacter*, które odgrywają ważną rolę w wiązaniu azotu atmosferycznego. Różne typy gleb wykazują odmienne cechy mikrobiologiczne. Posługując się przykładem gleb brunatnych czy rdzawych można stwierdzić, iż obejmują one podobny profil mikrobiologiczny, natomiast czarna ziemia i rędzina brunatna znacząco odbiegają od pozostałych typów. Największą aktywność enzymatyczną, świadczącą o wysokiej aktywności mikroorganizmów, odnotowano dotychczas w czarnej ziemi, madzie brunatnej i rędzinie brunatnej, natomiast najniższe wartości tego wskaźnika stwierdzono w glebach rdzawych. Liczebność mikroorganizmów różni się także w zależności od rodzaju gleby. Najwięcej bakterii i promieniowców występuje w glebie płowej, czarnej ziemi i madzie brunatnej, natomiast gleby rdzawe, które mają najniższe wartości pH, wykazują najniższą liczebność bakterii i największą dominację grzybów. Istotnym czynnikiem wpływającym na mikrobiom glebowy jest również zawartość węgla organicznego, która silnie koreluje z aktywnością enzymatyczną gleby. Najwyższą zawartość węgla organicznego stwierdza się w czarnej ziemi, co przekłada się na jej bogaty skład mikrobiologiczny (Siebielec i wsp. 2015).

Mikrobiom gleb antropogenicznych / Microbiome of anthropogenic soils

Mikrobiom gleb antropogenicznych, szczególnie gleb miejskich, znacząco różni się od mikrobiomu gleb naturalnych i subnaturalnych. Wpływa na to wiele czynników, m.in.:

- ugniatanie i okrywanie gleby, co wpływa na dostępność tlenu w glebie, faworyzując m.in. bakterie beztlenowe (Frene i wsp. 2024),
- zanieczyszczenie gleby metalami ciężkimi, solami i węglowodorami pochodzącymi z emisji przemysłowych i komunikacyjnych; na obszarach silnie zanieczyszczonych rozwijają się mikroorganizmy przystosowane do ich degradacji, m.in. *Pseudomonas* i *Rhodococcus* (Margesin i Schinner 2001),

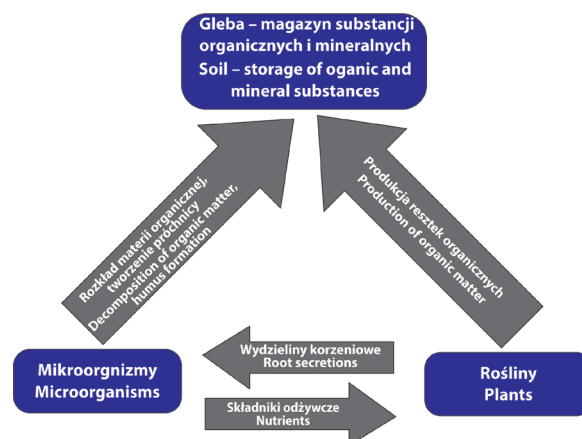
- nierówny napływ odzwierzęcej materii organicznej, takiej jak odchody i ścieki, które mogą zawierać mikroorganizmy, m.in. antybiotykooporne bakterie i patogeny odzwierzęce (Aminov 2009; Finley i wsp. 2013; Marti i wsp. 2013),
- miejska wyspa ciepła zwiększa temperaturę gleby i wpływa na metabolizm mikroorganizmów (Bérard i wsp. 2015; Qu i wsp. 2023).

Te podstawowe czynniki wpływają na kształtowanie się mikrobiomu, organiczając wzrost niektórych mikroorganizmów i faworyzując wzrost innych. W silnie zagęszczonych miejskich glebach zmniejsza się obecność grzybów mykoryzowych, które tworzą symbiotyczne związki z korzeniami roślin i przyczyniają się do pobierania składników odżywczych (Bainard i wsp. 2010; Rusterholz i wsp. 2020). Ponadto niektóre badania wykazały wzrost oportunistycznych grzybów patogennych, takich jak *Candida*, *Clavispora*, *Diutina* czy *Pichia*, prawdopodobnie z powodu działalności człowieka i zwierząt (Glushakova i wsp. 2022). Bakterie glebowe w środowisku miejskim zdominowane są przez typy Proteobacteria, Actinobacteria, Cyanobacteria i Bacteroidetes (Christel i wsp. 2023), przez ich zróżnicowane zdolności metaboliczne, pozwalające im przetrwać w bardzo zmiennych warunkach środowiska miejskiego. Na przykład gatunki *Pseudomonas* i *Bacillus* często występują w glebach miejskich ze względu na ich odporność na zanieczyszczenia i zdolność do degradacji węglowodorów (Verma i wsp. 2024; Zhang i wsp. 2024). Także niektóre gatunki archeonów wykazują również odporność na metale ciężkie, co czyni je ważnymi w reakcji mikrobiologicznej na zanieczyszczenie gleby miejskiej (Abbaszade i wsp. 2023). W miejskich glebach zagęszczonych i ubogich w składniki odżywcze szczególną rolę w obiegu azotu spełniają archeony utleniające amoniak (AOA), takie jak *Nitrososphaera* (Lehtovirta-Morley i wsp. 2016).

Funkcje mikrobiomu glebowego / Functions of the soil microbiome

Mikrobiom glebowy to fundament w utrzymaniu jakości gleby wpływający na jej funkcjonalność oraz zdolność do podtrzymywania procesów biologicznych. Mikroorganizmy obecne w glebie biorą udział w licznych przemianach biogeochemicznych, takich jak mineralizacja materii organicznej czy cyrkulacja pierwiastków odżywczych (rys. 1). Enzymy pochodzenia mikrobiologicznego uczestniczą w szeregu reakcji biochemicznych, rozkładzie złożonych związków organicznych, przemianach form azotu i fosforu oraz hydrolizie estrów siarczanowych. Procesy te są bezwzględnie ważne dla dostępności składników odżywczych dla roślin, a tym samym dla produktywności ekosystemów glebowych (Furtak i Gajda 2018).

Rośliny mają zdolność wydzielania substancji zwanych wydzielinami korzeniowymi, które pełnią niezbędną funkcję



Rys. 1. Interakcje między roślinami, mikroorganizmami glebowymi a glebą oraz procesy zachodzące pomiędzy tymi elementami (van Veen i wsp. 1997)

Fig. 1. Interactions between plants, soil microorganisms and soil and the processes taking place between these elements (van Veen et al. 1997)

w ich wzroście i rozwoju. Proces ten nie mógłby przebiegać efektywnie bez udziału mikroorganizmów, które zasiedlają ryzosferę – strefę gleby otaczającą korzenie. Obecność tych mikroorganizmów ułatwia roślinom pobieranie składników odżywczych z gleby (Gębarowska i wsp. 2010). Gleba pełni fundamentalną rolę jako magazyn substancji organicznych i mineralnych, które w kolejnych etapach cyklu stają się dostępne dla roślin. Jest także środowiskiem życia dla mikroflory glebowej, zdolnej do przekształcania związków fizjologicznych zawartych w podłożu. Szczególną rolę odgrywają mikroorganizmy saprotroficzne, które rozkładają martwą materię organiczną. Wśród nich dominującą grupę stanowią grzyby strzępkowe, takie jak *Penicillium*, *Mortierella* czy *Saprolegnia* (Nowak i Hawrot 2003; Gębarowska i wsp. 2010). Rozkład materii organicznej oraz powstawanie próchnicy to efekt degradacji obumierających resztek roślinnych przez mikroorganizmy glebowe. Procesy te określane są mianem mineralizacji i humifikacji – mineralizacja prowadzi do rozkładu złożonych substancji organicznych na formy przyswajalne przez rośliny, natomiast humifikacja odpowiada za tworzenie próchnicy, która poprawia właściwości gleby i wspomaga retencję składników pokarmowych (Galus-Barchan i Chmiel 2019).

Metody pomiaru aktywności mikroorganizmów w glebie / Methods for measuring the activity of microorganisms in soil

Analiza aktywności mikroorganizmów w glebie odbywa się za pomocą różnorodnych metod, które pozwalają ocenić ich zdolność do syntezy, asymilacji oraz degradacji związków chemicznych. Techniki biochemiczne umożliwiają identyfikację mikroorganizmów na podstawie ich metabolizmu,

a także pomiaru aktywności enzymatycznej gleby. W tym celu wykorzystuje się m.in. metody spektrofotometryczne, fluorometryczne, kolorymetryczne, chemiluminescencyjne, radiometryczne oraz chromatograficzne. Określanie aktywności enzymatycznej stanowi istotny wskaźnik jakości gleby, a jej wartość zależy od różnorodności i liczebności mikroorganizmów, warunków fizykochemicznych oraz czynników antropogenicznych, takich jak nawożenie czy sposób użytkowania terenu (Furtak i Gajda 2018).

Możliwości wykorzystania preparatów mikrobiologicznych poprawiających jakość gleby na terenach zurbanizowanych / Possibilities of using microbiological preparations to improve soil quality in urbanized areas

Zachodzące w glebie procesy biochemiczne nie tylko kształtują jej żyzność, ale mają także kluczowe znaczenie dla stabilności ekosystemów. Wzajemne oddziaływanie roślin, mikroorganizmów i gleby tworzy dynamiczny system, w którym każda z tych składowych pełni istotną rolę. Poprzez poprawienie mikrobiomu gleb antropogenicznych możliwe jest polepszenie tym samym warunków wzrostu dla roślin na terenach zurbanizowanych i wpłynięcie na ich odporność przeciwko patogenom i szkodnikom, a także zwiększenie ich odporności na niesprzyjające warunki siedliskowe. Zapewnienie jak najlepszych warunków do wzrostu roślin na terenach miejskich ma fundamentalne znaczenie, m.in. ze względu na problemy i ograniczenia prawne w stosowaniu chemicznych środków ochrony roślin w otoczeniu siedzib ludzkich. Obecnie na rynku znajduje się kilka preparatów zawierających mikroorganizmy wspomagające rozwój roślin i zwiększające ich odporność na warunki stresowe (tab. 1). Ważnym aspektem przy wyborze preparatu jest możliwość jego wprowadzenia na obszar już zagospodarowany, z nasadzonymi roślinami, który boryka się z niewystarczającą aktywnością mikrobiologiczną. Głównymi grupami organizmów, które są obecnie dostępne na rynku są grzyby z rodzaju *Glomus* i *Trichoderma*, grzyby tworzące ektomykoryzmy oraz bakterie *Bacillus*. W zestawieniu tabelarycznym przedstawiono wiodące preparaty mikoryzowe oraz oparte na mikroorganizmach, które mogą posłużyć jako naturalne środki do rewitalizacji środowiska glebowego na terenach miejskich.

Na rynku obecnie największa ilość preparatów poprawiających mikrobiom glebowy to preparaty zawierające grzyby mykoryzowe. Są to środki zawierające grzyby tworzące endomikoryzę (AMF), zwaną również mikoryzą arbuskularną na bazie grzybów typu *Glomeromycota*, ektomykoryzę (EMF) na bazie *Pisolithus tinctorius*, *Rhizopogon*, *Laccaria* oraz *Hebeloma* oraz mykoryzę erikoidalną (ERM) na bazie *Oidiodendron* i *Hymenoscyphus* (Borkowska 2011). Grzyby mikoryzowe odgrywają fundamentalną rolę w ochronie roślin przed patogenami i szkodnikami.

Współpracując z korzeniami, produkują substancje antybiotyczne, które skutecznie zwalczają drobnoustroje chorobotwórcze. Symbioza ta pobudza rośliny do wytwarzania związków chemicznych, takich jak fenole czy kwas szczawiowy, które hamują rozwój patogenów. Ektomykoryzy dodatkowo tworzą mufkę – fizyczną barierę chroniącą korzenie przed infekcjami. Dzięki temu ograniczają szkody wywoływane przez takie organizmy, jak *Fusarium*, *Pythium*, *Phytophthora* czy *Rhizoctonia*, które są odpowiedzialne za choroby prowadzące do gnicia korzeni (Krupa 2010). Ponadto, szczepionki mikoryzowe znacząco wspierają wzrost i zdrowie roślin, poprawiając ich zdolność do przyswajania składników odżywczych, zwłaszcza fosforu, kluczowego dla rozwoju korzeni i kwitnienia. Preparaty te poprawiają również strukturę gleby, zwiększając jej porowatość oraz retencję wody, co zmniejsza ryzyko erozji i wspiera ekosystem gleby poprzez rozwój różnorodności mikroorganizmów. Ekonomicznie szczepionki mikoryzowe ograniczają konieczność stosowania nawozów chemicznych, redukując koszty i jednocześnie chroniąc środowisko. Skuteczność szczepionek mykoryzowych zależy od liczby gatunków grzybów, które zawierają. Preparaty złożone z 3 do 5 gatunków grzybów są bardziej efektywne, podczas gdy mieszanki zawierające 15 lub więcej gatunków mogą mieć niższą skuteczność (Borkowska 2011).

Ponadto na bazie grzybów znajdują się środki oparte na kilku gatunkach *Trichoderma*, które posiadają dużą zdolność metabolizującą, co czyni ją rodzajem o szybkich zdolnościach adaptacyjnych, nawet w trudnych warunkach glebowych, dlatego idealnie wkomponowuje się w problematyczne środowisko (Gediga i wsp. 2000). Ze względu na jej właściwości mykopasożytnicze poprawia aspekt ochronny przed chorobami roślin, zabezpieczając korzenie roślin przed patogenami odglebowymi. Ponadto posiada zdolności biostymulujące wzrost roślin.

Drugą szeroką grupą zastosowaną w preparatach mikrobiologicznych poprawiających jakość gleby są bakterie z grupy *Bacillus* i *Streptomyces*. Wchodzą one w skład biostymulatorów oraz naturalnych nawozów roślinnych. Są to tak zwane ryzobakterie, bytujące w strefie korzeniowej roślin, wspomagając ich wzrost oraz ogólny stan fizjologiczny (Kuźniak i wsp. 2021). Działają na rośliny m.in. poprzez pobudzenie ich układu odpornościowego i produkcję fitohormonów, a także stymulują i mobilizują pobieranie takich składników, jak azot, fosfor czy potas. Mają także umiejętność produkcji osmoprotektantów, egzopolimerów oraz przeciwutleniaczy, które wspomagają tolerancję roślin na stresy środowiskowe (Gałązka i wsp. 2023). Bakterie z rodzaju *Bacillus* i *Pseudomonas* to najliczniejsza grupa reprezentatywna dla procesu denitryfikacji (Paśmionka 2017). Pozostałe bakterie stosowane do poprawy jakości gleb na terenach miejskich są w stanie przyspieszyć proces mineralizacji i humifikacji, a także poprawić strukturę gruzelkową gleby.

Tabela 1. Preparaty mikrobiologiczne dostępne na polskim rynku poprawiające jakość gleby na terenach zurbanizowanych
Table 1. Microbiological preparations available in Poland that improve soil quality in urbanized areas

Środek Product	Zawartość środka Contents of the agent	Formulacja i aplikacja Formulation and application	Działanie Way of action	Możliwość stosowania na rośliny w gruncie Suitable for in-ground plants	Ograniczenia stosowania Limitations of use
Mieszanka mikoryzowa uniwersalna Symbivit Symbivit universal mycorrhizal mixture	wyspecjalizowane szczepy grzybów arbuskularnych, grzyby <i>Glomus intraradices</i> , <i>Glomus mosseae</i> , <i>Glomus claroideum</i> , <i>Glomus etunicatum</i> specialized strains of arbuscular fungi, fungi <i>Glomus intraradices</i> , <i>Glomus mosseae</i> , <i>Glomus claroideum</i> , <i>Glomus etunicatum</i>	doglebowo soil-applied	wspiera rozwój roślin, zwiększa odporność na warunki stresowe oraz patogeny; zmniejsza zapotrzebowanie na wodę i nawozy supports plant development, increases resistance to stress conditions and pathogens; reduces the need for water and fertilizers	tak yes	brak, zawarte mikroorganizmy tworzą symbiozę z większością roślin naczyniowych; najlepiej stosować na rośliny i krzewy liściaste oraz kwiaty none, the microorganisms contained form symbiosis with most vascular plants; best used on deciduous plants and shrubs and flowers
Mieszanka mikoryzowa Trawnik Turf comp Turf comp mycorrhizal mixture	<i>Glomus intraradices</i> , <i>Glomus mosseae</i> , <i>Glomus etunicatum</i> , <i>Glomus clarum</i> , <i>Glomus deserticola</i> , <i>Glomus aggregatum</i>	doglebowo soil-applied	nadaje trawnikowi lepszy wygląd i wspomaga wzrost we wczesnej fazie wegetacji gives the lawn a better appearance and supports growth in the early vegetation phase	tak yes	brak, zawarte mikroorganizmy tworzą symbiozę z większością roślin naczyniowych none, the microorganisms contained form symbiosis with most vascular plants
Mieszanka mikoryzowa Ectovit Ectovit mycorrhizal mixture	grzyby <i>Pisolithus tinctorius</i> , <i>Rhizopogon</i> spp., <i>Laccata</i> spp. grzyby z rodziny pierścieniakowatych należące do <i>Hebeloma</i> fungi <i>Pisolithus tinctorius</i> , <i>Rhizopogon</i> spp., <i>Laccata</i> spp. fungi from the family <i>Strophariaceae</i> belonging to <i>Hebeloma</i>	doglebowo soil-applied	poprawa wzrostu i ogólnej kondycji roślin, zwiększa przy tym odporność na stres środowiskowy, wspomagając pobieranie mikro- i makroelementów, w szczególności fosforu i żelaza improvement of the growth and general condition of plants, increase resistance to environmental stress, support the uptake of micro- and macro-elements, in particular phosphorus and iron	tak yes	brak, zawarte mikroorganizmy tworzą symbiozę z większością roślin naczyniowych; nie zaleca się stosowania do tui oraz drzewowocowych none, the microorganisms contained form symbiosis with most vascular plants; not recommended for use on thuja and fruit trees
Mieszanka mikoryzowa Rhodovit Rhodovit mycorrhizal mixture	grzyby z rodzaju <i>Oidiodendron</i> i <i>Hymenoscyphus</i> fungi of the genera <i>Oidiodendron</i> and <i>Hymenoscyphus</i>	doglebowo soil-applied	wspomaga odżywianie, wzrost oraz ogólną kondycję roślin, dodatkowo zwiększa odporność na stres środowiskowy supports the nutrition, growth and general condition of plants, additionally increases resistance to environmental stress	tak yes	środek należy stosować tylko i wyłącznie do roślin wrzosowatych the product should only be used for heather plants <i>Ericaceae</i>

Tabela 1. Preparaty mikrobiologiczne dostępne na polskim rynku poprawiające jakość gleby na terenach zurbanizowanych – cd.
Table 1. Microbiological preparations available in Poland that improve soil quality in urbanized areas – continued

Środek Product	Zawartość środka Contents of the agent	Formulacja i aplikacja Formulation and application	Działanie Way of action	Możliwość stosowania na rośliny w gruncie Suitable for in-ground plants	Ograniczenia stosowania Limitations of use
Mieszanka mikoryzowa Mycelium do drzew liściastych i owocowych Mycelium mycorrhizal mixture for deciduous and fruit trees	<i>Glomus intraradices</i> , <i>Rhizophagus niereularis</i>	doglebowo soil-applied	zwiększa odporność na choroby i różnego rodzaju patogeny glebowe, a tym samym na stres środowiskowy increases resistance to diseases and various types of soil pathogens, thereby increas- ing resistance to environmental stress	tak yes	brak, zawarte mikro- organizmy tworzą symbiozę z większością roślin naczyniowych none, the microorgan- isms contained form symbiosis with most vascular plants
Trichoderma, Vital Plus, Vital Tricho	w skład preparatów wchodzi różne gatunki <i>Trichoderma</i> , m.in. <i>T. atroviride</i> , <i>T. atroviride</i> , <i>T. viride</i> , <i>T. koningii</i> the products contains various species of <i>Trichoderma</i> e.g. <i>T. atroviride</i> , <i>T. atroviride</i> , <i>T. viride</i> , <i>T. koningii</i>	oprysk doglebo- wy/ fertygacja/ podlewanie soil spraying/ fertigation/ watering	wzmocnienie rośliny poprzez stymulację korzeni, dodatkowo zwiększa odporność na pato- geny glebowe, a także ma działanie mikrobójcze root stimulation, effective against soil pathogens, has a microbicidal effect	tak yes	brak, zawarte mikroor- ganizmy wchodzi w relacje z większością roślin naczyniowych; preparat działa najlepiej przed nasadzeniem sadzonek w grunt; Vital Plus należy stosować przed nasadzeniem none, the microorgan- isms contained form symbiosis with most vascular plants; the products work best before planting the seedlings in the ground; Vital Plus should be used before planting
Bi Fosfor, Biofosforin, BaktoProFOS	<i>Bacillus megaterium</i>	doglebowo/ oprysk/ nawadnianie kroplowe soil/spray/ drip irrigation	przekształca niedostępny dla roślin fosfor w łatwo przyswajalną formę, co wspomaga wzrost i wydajność roślin converts phosphorus un- available for plants into an easily absorbable form, which supports plant growth and productivity	tak yes	brak, tworzy symbiozę z większością roślin naczyniowych none, the microorgan- isms contained form symbiosis with most vascular plants

Tabela 1. Preparaty mikrobiologiczne dostępne na polskim rynku poprawiające jakość gleby na terenach zurbanizowanych – cd.
Table 1. Microbiological preparations available in Poland that improve soil quality in urbanized areas – continued

Środek Product	Zawartość środka Contents of the agent	Formulacja i aplikacja Formulation and application	Działanie Way of action	Możliwość stosowania na rośliny w gruncie Suitable for in-ground plants	Ograniczenia stosowania Limitations of use
Bi safe	<i>Bacillus</i> sp. <i>Streptomyces</i> sp.	doglebowo soil-applied	poprawia strukturę i stan biologiczny gleby, co zwiększa przyswa- jalność mikro- i makro- składników odżywczych improves the structure and biological condition of the soil, which increases the absorption of micro- and macronutrients	tak yes	brak, tworzy symbiozę z większością roślin naczyniowych none, the microorgan- isms contained form symbiosis with most vascular plants
Fundamental	<i>Saccharomyces</i> sp. <i>Rhodopeudomonas</i> sp.	doglebowo soil-applied	zwiększa bioróżnorodność mikroorganizmów; zwiększa prędkość rozkładu biomasy, co poprawia agregację glebową increases the biodiversity of microorganism; increases the rate of biomass decomposition, which improves soil ag- gregation	tak yes	brak, tworzy symbiozę z większością roślin naczyniowych none, the microorgan- isms contained form symbiosis with most vascular plants
EmFarma, EmFarma Plus	<i>Lactobacillus planatrum</i>	doglebowo/ oprysk soil-applied/ spraying	zwiększa intensywność procesów biologicznych w glebie, co mobilizuje mikroorgani- zmy do szybszej humifika- cji materii organicznej increases the intensity of biological processes in the soil, which mobilizes microor- ganisms to faster humifica- tion of organic matter	tak yes	brak, tworzy symbiozę z większością roślin naczyniowych none, the microorgan- isms contained form symbiosis with most vascular plants

Zestawienie przedstawione w tabeli sporządzono na podstawie ogólnodostępnych źródeł internetowych, ofert sklepów internetowych i stacjonarnych, w tym firm Biopon, Symbiom, Mycoflor (stan na marzec 2025 r.) oraz informacji zawartych w literaturze naukowej
The summary presented in the table was compiled based on publicly available online sources, offers from both online and physical stores, including companies such as Biopon, Symbiom, and Mycoflor (as of March 2025) as well as information from scientific literature

Przyszłe perspektywy / Future prospects

Przyszłe perspektywy w dziedzinie rewitalizacji gleb miejskich z wykorzystaniem mikroorganizmów wydają się być obiecujące i wielokierunkowe. Istotne jest zidentyfikowanie i selekcjonowanie mikroorganizmów o wysokim potencjale rewitalizacyjnym, dostosowanych do specyficznych wyzwań środowiska miejskiego. Ważnym kierunkiem rozwoju jest opracowywanie bardziej zaawansowanych i ukie-

runkowanych preparatów mikrobiologicznych, które będą charakteryzować się wyższą skutecznością i stabilnością w warunkach miejskich. Należy również prowadzić badania nad optymalnymi metodami aplikacji tych preparatów oraz ich długoterminowym wpływem na ekosystemy glebowe i zdrowie roślin. Przyszłe działania powinny również skupić się na integracji strategii mikrobiologicznej rewitalizacji gleb z innymi działaniami z zakresu zrównoważonego rozwoju miast, takimi jak gospodarowanie wodami opado-

wymi, kompostowanie odpadów organicznych i tworzenie zielonej infrastruktury. Współpraca między naukowcami, władzami lokalnymi, społecznością oraz innymi intere-

sariuszami jest kluczowa dla skutecznego wdrażania tych rozwiązań.

Literatura / References

- Abbaszade G., Toumi M., Farkas R., Vajna B., Krett G., Dobosy P., Szabó C., Tóth E. 2023. Exploring the relationship between metal(loid) contamination rate, physicochemical conditions, and microbial community dynamics in industrially contaminated urban soils. *Science of The Total Environment* 897: 166094. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.166094
- Aminov R. I. 2009. The role of antibiotics and antibiotic resistance in nature. *Environmental Microbiology* 11 (12): 2970–2988. DOI: 10.1111/j.1462-2920.2009.01972.x
- Bainard L.D., Klironomos J.N., Gordon A.M. 2010. The mycorrhizal status and colonization of 26 tree species growing in urban and rural environments. *Mycorrhiza* 21 (2): 91–96. DOI: 10.1007/s00572-010-0314-6
- Bérard A., Ben Sassi M., Kaisermann A., Renault P. 2015. Soil microbial community responses to heat wave components: drought and high temperature. *Climate Research* 66 (3): 243–264. DOI: 10.3354/cr01343
- Borkowska B. 2011. Mikoryza. s. 224–250. W: *Fizjologia roślin sadowniczych Tom 1* (L.S. Jankiewicz, J. Lipecki, red.). Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 480 ss. ISBN 978-83-01-16685-4.
- Christel A., Dequiedt S., Chemidlin-Prevost-Bouré N., Mercier F., Tripied J., Comment G., Djemiel C., Bargeot L., Matagne E., Fougereon A., Mina Passi J.-B., Ranjard L., Maron P.-A. 2023. Urban land uses shape soil microbial abundance and diversity. *Science of The Total Environment* 883: 163455. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.163455
- Finley R.L., Collignon P., Larsson D.G., McEwen S.A., Li X.Z., Gaze W.H., Reid-Smith R., Timinouni M., Graham D.W., Topp E. 2013. The scourge of antibiotic resistance: the important role of the environment. *Clinical Infectious Diseases* 57 (5): 704–710. DOI: 10.1093/cid/cit355
- Frene J.P., Pandey B.K., Castrillo G. 2024. Under pressure: elucidating soil compaction and its effect on soil functions. *Plant and Soil* 502: 267–278. DOI: 10.1007/s11104-024-06573-2
- Furtak K., Gajda A.M. 2018. Biochemical methods for the evaluation of the functional and structural diversity of microorganisms in the soil environment. *Postępy Mikrobiologii* 57 (2): 194–202. DOI: 10.21307/PM-2018.57.2.194
- Galus-Barchan A., Chmiel M.J. 2019. Rola drobnoustrojów w pozyskiwaniu przez rośliny składników pokarmowych. [The role of microorganisms in acquisition of nutrients by plants]. *Kosmos Problemy Nauk Biologicznych* 68 (1): 107–114.
- Gałazka A., Ciepiel J., Marzec-Grządziel A., Kozieł M., Gawryjolek K., Janczarek A., Abramczyk B. 2023. Poradnik preparaty mikrobiologiczne dla roślin rolniczych. Instytut Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa – Państwowy Instytut Badawczy, Puławy, 56 ss. ISBN 978-83-7562-406-9. DOI: 10.26114/por.iung.2023.12.01
- Gediga K., Matkowski K., Płaskowska E. 2000. *Trichoderma harzianum* Rifai jako kolonizator gleb skażonych niklem i ołowiem. [Trichoderma harzianum Rifai as a colonizer of soils polluted with nickel and lead]. *Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych* 471: 903–911.
- Gębarowska E., Pietr S.J., Stankiewicz M., Kucińska J., Magnucka E. 2010. Wybrane zagadnienia i materiały do ćwiczeń z mikrobiologii. Wydanie II poprawione. Wydawnictwo Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu, 152 ss. ISBN 978-83-60574-86-7.
- Glushakova A.M., Kachalkin A.V., Umarova A.B., Ivanova A.E., Prokofeva T.V. 2022. Changes in urban soil yeast communities after a reduction in household waste during the COVID-19 pandemic. *Pedobiologia* 93–94: 150822. DOI: 10.1016/j.pedobi.2022.150822
- Krupa A. 2010. Mikoryzy i ich wielofunkcyjna rola w środowisku. [Mycorrhizas and their multifunctional role in the environment]. *Chemistry, Environment, Biotechnology* 14: 175–182.
- Kuźniak A., Włodarczyk K., Gromadzka P., Siara A., Wolińska A. 2021. Aktualny stan wiedzy na temat biopreparatów stosowanych w rolnictwie. Wydawnictwo KUL, Lublin, 32 ss. ISBN 978-83-8061-964-7.
- Lehtovirta-Morley L.E., Sayavedra-Soto L.A., Gallois N., Schouten S., Stein L.Y., Prosser J.I., Nicol G.W. 2016. Identifying potential mechanisms enabling acidophily in the ammonia-oxidizing archaeon „Candidatus Nitrosotalea devanattera”. *Applied and Environmental Microbiology* 82 (9): 2608–2619. DOI: 10.1128/AEM.04031-15
- Margesin R., Schinner F. 2001. Biodegradation and bioremediation of hydrocarbons in extreme environments. *Applied Microbiology and Biotechnology* 56 (5–6): 650–663. DOI: 10.1007/s002530100701
- Marti E., Jofre J., Balcazar J.L. 2013. Prevalence of antibiotic resistance genes and bacterial community composition in a river influenced by a wastewater treatment plant. *PLoS One* 8 (10): e78906. DOI: 10.1371/journal.pone.0078906
- Nowak A., Hawrot M. 2003. Wpływ zabiegów bioremediacyjnych na stopień rozkładu oleju napędowego w glebach o odmiennym składzie mechanicznym oraz różnej zawartości materii organicznej. [Effect of bioremediation treatments on diesel oil decomposition level in soils of different mechanical composition and organic matter content]. *Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych* 492: 211–216.
- Paśmionka I. 2017. Mikrobiologiczne przemiany azotu glebowego. [Microbiological transformations of soil nitrogen]. *Kosmos Problemy Nauk Biologicznych* 66 (2): 185–192.
- Systematyka gleb Polski 2019. Polskie Towarzystwo Gleboznawcze, Komisja Genezy Klasyfikacji i Kartografii Gleb. Wydawnictwo Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu, Polskie Towarzystwo Gleboznawcze, Wrocław–Warszawa, 292 ss. ISBN 978-83-7717-321-3.
- Qu R., Liu G., Yue M., Wang G., Peng C., Wang K., Gao X. 2023. Soil temperature, microbial biomass and enzyme activity are the critical factors affecting soil respiration in different soil layers in Ziowuling Mountains, China. *Frontiers in Microbiology* 14: 1105723. DOI: 10.3389/fmicb.2023.1105723

- Rusterholz H.P., Studer M., Zwahlen V., Baur B. 2020. Plant-mycorrhiza association in urban forests: Effects of the degree of urbanisation and forest size on the performance of sycamore (*Acer pseudoplatanus*) saplings. *Urban Forestry & Urban Greening* 56 (5): 126872. DOI: 10.1016/j.ufug.2020.126872
- Siebielec G., Siebielec S., Podolska G. 2015. Porównanie mikrobiologicznej i chemicznej charakterystyki gleb po ponad 100 latach uprawy roślin zbożowych. [Comparison of microbial and chemical characteristics of soil types after over 100 years of cereal production]. *Polish Journal of Agronomy* 23: 88–100.
- Strzelecka E. 2011. Rewitalizacja miast w kontekście zrównoważonego rozwoju. [Urban revitalization in the context of sustainable development]. *Budownictwo i Inżynieria Środowiska* 2 (4): 661–668.
- Świtoniak M., Bednarek R., Mendyk Ł., Dzierzyk P. 2012. Wpływ denudacji antropogenicznej na pokrywę glebową zagłębienia bezodpływowego w rezerwacie Retno. Rozdział 2.3. s. 59–74. W: *Postglacjalna historia zagłębienia bezodpływowego w rezerwacie Retno (Pojezierze Brodnickie)* Wydanie 1 (M. Karasiewicz, P. Hulisz, M. Świtoniak, red.). Wydawnictwo Naukowe Uniwersytetu Mikołaja Kopernika, Toruń, 162 ss. ISBN 978-83-231-2843-4.
- van Veen J.A., van Overbeek L.S., van Elsas J.D. 1997. Fate and activity of microorganisms introduced into soil. *Microbiology and Molecular Biology Reviews* 61 (2): 121–135. DOI: 10.1128/mmbr.61.2.121-135.1997
- Verma K., Sharma G., Sinha P.G., Nishu, Mathur V. 2024. Identifying bacteria from urban soil for degrading soil organic contaminants of emerging concern. *Water, Air, & Soil Pollution* 235 (12): 797. DOI: 10.1007/s11270-024-07586-4
- Zhang S., Zuo X., Wei G., Wang H., Gao Y., Ling W. 2024. Immobilized *Pseudomonas* spp. for bioremediation of soils contaminated with emerging organic pollutants. *Applied Soil Ecology* 204: 105717. DOI: 10.1016/j.apsoil.2024.105717