

**Grzegorz Siebielec, Sylwia Siebielec, Radosław Kaczyński, Dominika Gmur,
Piotr Koza**

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

EGZOGENNA MATERIA ORGANICZNA JAKO ELEMENT EUROPEJSKIEGO ZIELONEGO ŁADU*

Słowa kluczowe: bionawozy, poferment, kompost, obornik, osad ściekowy, gleba

Rola materii organicznej w glebie

Materia organiczna gleb (SOM) jest podstawowym wskaźnikiem jakości gleb. Pełni ważną rolę w utrzymaniu najistotniejszych fizycznych, chemicznych i mikrobiologicznych cech gleby, decydujących o jej produkcyjnym potencjale oraz zdolności do pełnienia funkcji środowiskowych. SOM ma wpływ na potencjał sorpcyjny gleby, regulując obieg pierwiastków w biosferze i tempo ich wymywania z gleby, oraz na potencjał buforowy gleby odpowiedzialny za utrzymywanie właściwego pH. Wysoka zawartość materii organicznej w glebie jest czynnikiem stabilizującym jej strukturę, zmniejszającym podatność na zagęszczenie oraz degradację w wyniku erozji wodnej i wietrznej. Materia organiczna gleby odgrywa ważną rolę w obiegu wody, kształtując odporność upraw na niekorzystne warunki wodne związane zarówno z czasowym niedoborem, jak i nadmiarem wody w glebie. Rola materii organicznej w przeciwdziałaniu suszy jest związana z jej właściwościami retencyjnymi w stosunku do wody oraz kształtowaniem właściwej struktury gleby, sprzyjającej zatrzymywaniu większych ilości wody w glebie. Większa odporność gleb o wysokiej zawartości materii organicznej na zagęszczenie, zależna od materii organicznej gleby, ogranicza straty wody deszczowej poprzez spływ po powierzchni gleby (28). Materia organiczna gleby ma również podstawowe znaczenie dla kształtowania bioróżnorodności gleb i całego krajobrazu, która przekłada się na stabilność ekosystemów i ich odporność na

*Opracowanie wykonano w ramach zadania 2.0 pt. „Ochrona gleb użytkowanych” z dotacji budżetowej przeznaczonej na realizację zadań MRiRW w 2021 r.

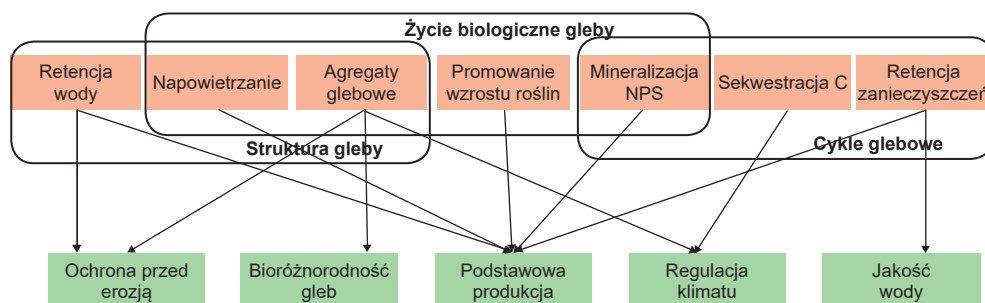
niekorzystne warunki. Na rysunku 1 przedstawiono wpływ materii organicznej na inne cechy gleby, kluczowe dla produkcji rolniczej oraz ograniczania negatywnych skutków środowiskowych związanych z rolnictwem.



Rys. 1. Schemat powiązań pomiędzy właściwościami gleby a materią organiczną oraz zyski środowiskowe związane z wysoką zawartością materii organicznej w glebie

Źródło: opracowanie własne

Badania glebowej materii organicznej przez wiele lat koncentrowały się na żyzności gleby, a później na interakcjach z zanieczyszczeniami gleby. Wzrastająca świadomość globalnych procesów zachodzących na świecie spowodowała, że uwaga środowiska naukowego przesunęła się w kierunku sekwestracji węgla jako czynnika regulacji klimatu oraz innych funkcji ekosystemowych materii organicznej (12, 15) (rys. 2).



Rys. 2. Funkcje ekosystemowe glebowej materii organicznej i procesy je wspierające

Źródło: Hoffland i in., 2020 (12)

Egzogenna materia organiczna w zrównoważonej produkcji rolnej

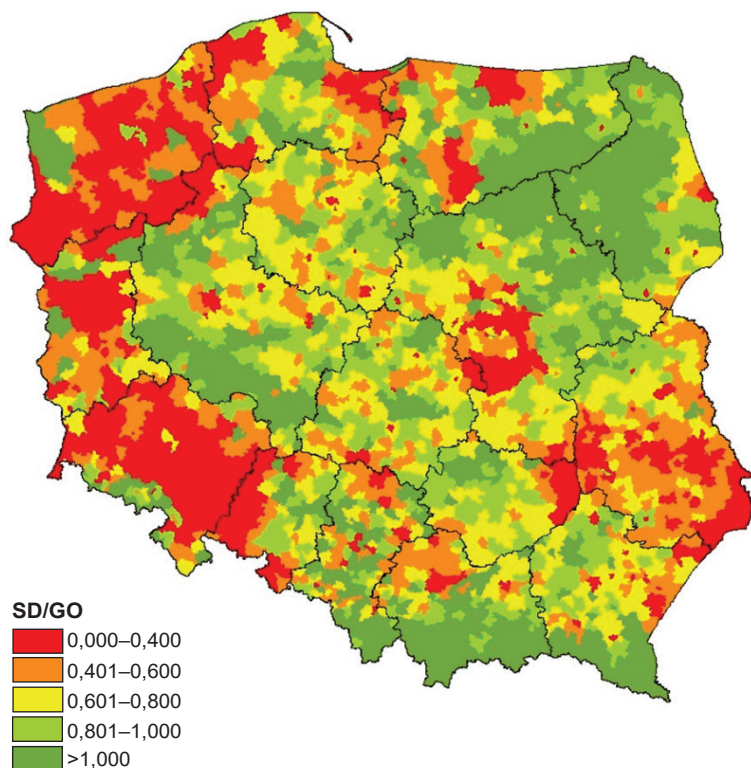
Europejski Zielony Ład (EZŁ) zawiera plan działań umożliwiających bardziej efektywne wykorzystanie zasobów dzięki przejściu na gospodarkę o obiegu zamkniętym, przeciwdziałaniu utracie różnorodności biologicznej i zmniejszeniu poziomu zanieczyszczeń. Jedną z strategii EZŁ „od pola do stołu” ma rozwijać zrównoważony system żywnościowy w UE, dla zapewnienia bezpieczeństwa żywnościowego oraz dostępu mieszkańców do zdrowej żywności. Strategia zakłada również zmniejszenie śladu środowiskowego i klimatycznego sektora produkcji żywności w UE. Do celów strategii należy znaczne zmniejszenie stosowania pestycydów i ryzyka z tym związanego oraz ograniczenie aplikowania nawozów i strat składników nawozowych. Biorąc pod uwagę globalne trendy stałego przyrostu populacji ludzi i zużycia składników nawozowych w rolnictwie (13) oraz stały ubytek gruntów rolnych w wyniku procesów urbanizacyjnych (20), wydaje się, że osiągnięcie celów nakreślonych przez EZŁ jest możliwe jedynie poprzez połączenie wielu jednoczesnych działań, takich jak:

- ograniczenie strat żywności;
- bardziej efektywna gospodarka wodą;
- precyzyjne rolnictwo;
- nowe postawy i oczekiwania społeczeństw w zakresie gospodarowania zasobami naturalnymi;
- cyrkularne wykorzystanie odpadów i składników nawozowych;
- stosowanie w rolnictwie rozwiązań opartych na naturze (ang. *Nature Based Solutions*);
- badania naukowe w bliskim partnerstwie nauki i przemysłu;
- regeneracja i pełne wykorzystanie naturalnego potencjału gleb.

Gleba jest kluczowym zasobem a wtórne wykorzystanie składników nawozowych i materii organicznej kluczowym działaniem dla możliwości osiągnięcia ambitnych celów EZŁ. Efektywnym narzędziem dla realizacji zamierzeń EZŁ powinny być bezpieczne bionawozy. Bionawozy mogą zawierać znaczne ilości egzogennej materii organicznej (EOM) oraz takich składników, jak fosfor i azot.

Rola bionawozów i EOM wzrasta, ponieważ w ostatnich latach w niektórych regionach naszego kraju następuje przyrost powierzchni użytków rolnych wykorzystywanych dla celów produkcji roślinnej w gospodarstwach bezinwentarzowych, a więc pozbawionych nawożenia organicznego. Według danych GUS (34) obsada zwierząt (bydła i trzody chlewnej) na poziomie kraju nie zmieniała się zasadniczo w przeciągu ostatnich 20 lat, natomiast obserwowano zróżnicowanie regionalne charakteru produkcji rolniczej. Następuje koncentracja produkcji zwierzęcej w niektórych regionach, co może powodować presję na środowisko wodne, związaną z nadmiarem biogenów. Z kolei w innych regionach występuje znaczny deficyt nawozów naturalnych, wynikający z zaniechania produkcji zwierzęcej, czego skutkiem może być negatywny bilans materii organicznej w glebach. Na rysunku 3 przedstawiono uproszczony

wskaźnik dla gmin w pewnym stopniu charakteryzujący dostępność nawozów naturalnych (obornik) dla gruntów użytkowanych w sposób orny (28).



Rys. 3. Obsada zwierząt w przeliczeniu na powierzchnię zasiewów i sadów (sztuk dużych $\cdot$ ha⁻¹) w ujęciu dla gmin

Źródło: Siebielec i Łopatka, 2013 (29)

Z uwagi na deficyt obornika jako podstawowego źródła materii organicznej, brane są pod uwagę alternatywne i dość powszechnie dostępne egzogenne źródła materii organicznej, takie jak osady ściekowe czy poferment.

Gleby Polski zawierają mało materii organicznej, gdyż w pokrywie glebowej dominują gleby lekkie wytworzone piasków. Są one przewiewne, a niektóre z nich trwale za suche. Charakteryzują się niską zawartością frakcji koloidalnej (<0,002 mmm), co nie sprzyja akumulacji próchnicy w glebach. Średnia zawartość materii organicznej w glebach gruntów ornych kraju na podstawie programu badań z lat 2016–2020 wynosi 2,26%, a mediana nie przekracza 2% (1,98) (28). W związku z tym wzrasta rola EOM, która sprzyja zwiększeniu lub co najmniej utrzymaniu poziomu materii organicznej w glebie.

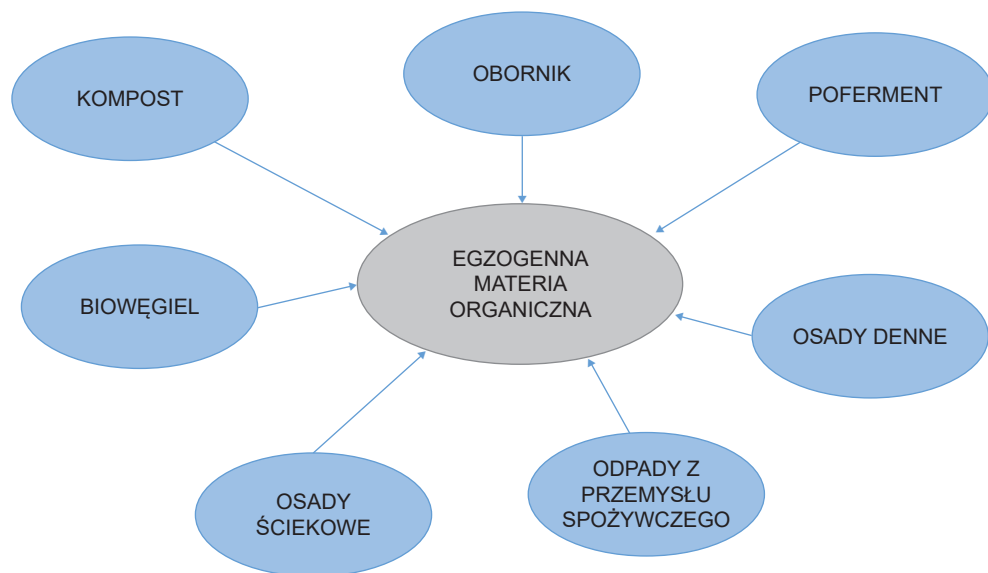
Egzogenna materia organiczna może być również znaczącym źródłem fosforu, który jest niezbędny dla wszystkich żywych organizmów. Człowiek pozyskuje fosfor z pożywienia, w którym pierwiastek ten pochodzi z nawozów fosforowych stosowanych podczas jego produkcji. Fosfor jest zatem kluczowym globalnym zasobem. Około 85–90% fosforytu wydobywanego na świecie jest przeznaczone do produkcji żywności (pozostała część przeznaczona jest do zastosowań przemysłowych, takich jak np. produkcja detergentów). W 2006 roku US Geological Survey oszacowało światowe rezerwy fosforytu, czyli złoża, które można obecnie eksploatować w ekonomicznie opłacalny sposób, na około 18 000 mln ton, podczas gdy jego mniej dostępne zasoby (złoża, które są możliwe do wykorzystania pod warunkiem postępu technologii wydobywania i przetwarzania) na około 50 000 mln ton. Szacuje się, że przy obecnym tempie wykorzystania powyższe zasoby mogą wystarczyć na 100–470 lat. To oznacza, że całkowite globalne zasoby fosforu są mocno ograniczone (10). Szacunki wskazują, iż wzrost zapotrzebowania na fosfor osiągnie globalny szczyt około 2030 roku. W związku z powyższym fosfor został przez Komisję Europejską wpisany na listę surowców krytycznych. Jednocześnie stopień wtórnego wykorzystania fosforu jest nadal niewielki. Priorytetem jest zatem podjęcie działań mających na celu ograniczenie stosowania tego pierwiastka ze źródeł kopalnych w rolnictwie na korzyść alternatywnych źródeł fosforu oraz optymalizacja wykorzystania fosforu wprowadzanego do gleby. Jednym z głównych celów nowej polityki nawozowej UE jest zachęcanie do produkcji nawozów na dużą skalę z krajowych surowców, w tym surowców wtórnych, zgodnie z zasadami gospodarki o obiegu zamkniętym, między innymi poprzez przekształcanie produktów ubocznych z przemysłu rolno-spożywczego w nowe bionawozy. Ryzyko związane z uzależnieniem się UE od importu fosforytu ma również kontekst geopolityczny, gdyż większość kopalnych zasobów fosforu jest zlokalizowana w zaledwie kilku krajach położonych poza Europą.

Do potencjalnych alternatywnych źródeł fosforu wykorzystujących wtórny obieg tego pierwiastka należą: osady ściekowe, struwit, obornik, komposty na bazie obornika i osadu ściekowego, toryfikat na bazie obornika i osadu ściekowego, mączki z odpadów zwierzęcych. Dla przykładu, średnio komunalne osady ściekowe wytwarzane w Polsce zawierają 2,6% azotu (N) i 1,83% fosforu (P) w suchej masie (31), stanowiąc znaczny rezerwuár tych składników nawozowych.

Rolnictwo na całym świecie stoi przed takimi wyzwaniami, jak zwiększenie produktywności i dochodów, dostosowanie się do zmian klimatu, zmniejszenie emisji gazów cieplarnianych i efektywna gospodarka wodą. Wśród praktyk wspomagających realizację tych wyzwań recykling EOM może odgrywać znaczącą rolę. Bionawozy oparte na EOM zmniejszają uzależnienie rolnictwa od zasobów nieodnawialnych, takich jak nawozy mineralne. Jako nawozy niesyntetyczne, EOM są niezbędne w rolnictwie ekologicznym.

Egzogenna materia organiczna to wszelki materiał organiczny pochodzenia biologicznego stosowany do gleby w celu poprawy środowiska glebowego lub zapobiegania stratom materii organicznej w glebach rolniczych (9). Jej wpływ na plonowanie roślin

uprawnych, akumulację węgla w glebie czy wykorzystanie azotu był dość szeroko badany. Dane literaturowe wskazują jednak, że potrzebna jest jednak lepsza charakterystyka dużej różnorodności EOM i zmienności efektów ich stosowania do gleby, aby określić ilościowo ich potencjał do magazynowania węgla w glebie, zwłaszcza w odniesieniu do EOM, która została poddana obróbce, takiej jak kompostowanie lub fermentacja beztlenowa (8). Potencjalnie najistotniejsze źródła EOM w warunkach Polski zostały przedstawione na rysunku 4.



Rys. 4. Najistotniejsze rodzaje egzogennej materii organicznej

Źródło: opracowanie własne

EOM występuje w różnych formach (stałe, płynne) i może być w wieloraki sposób przetwarzana przed zastosowaniem do gleby. W zależności od substratu z jakiego powstała, będzie mieć zróżnicowany skład chemiczny i poziom zanieczyszczeń. W konsekwencji efekty wprowadzenia EOM do gleby mogą być zróżnicowane (16). Zastosowanie egzogennej materii organicznej do gleby pozwala zminimalizować strumienie odpadów i prowadzić recykling składników nawozowych.

Na poziomie europejskim każdego roku produkuje się około 1200 milionów ton EOM, podczas gdy roczna produkcja w samych Włoszech wynosi około 150 milionów ton (17). Odpady organiczne pochodzące z obszarów miejskich występują obficie na obszarach gęsto zaludnionych, a mimo to w niewystarczającym stopniu podlegają recyklingowi. Nowa polityka nawozowa UE, której efektem jest rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2019/1009 (25), ma ułatwiać wykorzystanie EOM w rolnictwie i szersze wprowadzenie na rynek nawozów z bioodpadów. Roz-

porządzenie wskazuje między innymi, że *...na rynku istnieje popyt na stosowanie jako produktów nawozowych niektórych odpadów z odzysku w rozumieniu dyrektywy Parlamentu Europejskiego i Rady 2008/98/WE, takich jak struwit, biowęgiel i produkty na bazie popiołów*. W innym miejscu powyższe rozporządzenie odnosi się do bezpiecznej EOM w następujący sposób: *...począwszy od momentu spełnienia wszystkich wymogów niniejszego rozporządzenia, produktów takich nie należy już uznawać za odpady w rozumieniu dyrektywy 2008/98/WE oraz powinno być zatem możliwe, by produkty nawozowe zawierające takie odzyskane materiały odpadowe lub składające się z nich miały dostęp do rynku wewnętrznego*. Jednocześnie wskazano potrzebę badań naukowych i określenia wymogów dotyczących bezpiecznego odzysku składników z bioodpadów: *...po wejściu w życie niniejszego rozporządzenia należy w stosunku do takich produktów rozpocząć przeprowadzanie analiz naukowych i ustalanie wymogów dotyczących odzysku na poziomie Unii*.

Obornik

Obornik zwierzęcy jest klasycznym nawozem organicznym stosowanym od wieków w rolnictwie. Powstaje w wyniku zmieszania odchodów zwierzęcych i słomy. Obornik stanowi źródło składników nawozowych, węgla jako substratu do tworzenia próchnicy glebowej, a także stanowi miejsce bytowania mikroorganizmów, które pozytywnie wpływają na życie biologiczne gleby. Skład chemiczny obornika może być zróżnicowany, w zależności od gatunku i wieku zwierząt, sposobu ich żywienia oraz jakości skarmianej paszy, a także od stanu zwierzęcia, ilości stosowanej ściółki oraz stopnia przefermentowania materiału. Obornik może obficie dostarczać składników odżywczych, takich jak azot (N), fosfor (P), a nawet potas (K). Rayne i Aula (23) podsumowują wpływ obornika na szeroko rozumiane zdrowie gleby. Według autorów, obornik z reguły wpływa korzystnie na wiele cech gleby decydujących o jej zdrowiu, między innymi dostarczając składników pokarmowych i poprawiając właściwości gleby (zawartość węgla, właściwości fizyczne, aktywność biologiczna). Stopień korzystnego oddziaływania może być jednak zmienny i zależy od różnych czynników, w tym chemicznych i fizycznych właściwości samego obornika oraz czynników zewnętrznych (klimat i właściwości gleby). Sposób stosowania obornika musi zapewniać poprawę właściwości gleb, produktywności roślin, przy jednoczesnym zmniejszeniu zagrożeń dla środowiska. Duża zmienność cech obornika, a co za tym idzie niepełna przewidywalność efektów jego zastosowania stanowi wyzwanie dla zrównoważonego gospodarowania tym nawozem. Składniki nawozowe wprowadzone do gleby z obornikiem mogą podlegać stratom w wyniku erozji gleby oraz ich wymywania i ulatniania się, w zależności od stosowanej praktyki rolniczej i warunków glebowych. Pewne wyzwanie stanowi również transport i aplikacja obornika, co powoduje, że jego stosowanie jest nieatrakcyjne z punktu widzenia koniecznej pracy i kosztów. Przewożenie dużych ilości obornika z miejsc jego koncentracji w regionach o dużym nasyceniu produkcji zwierzęcej staje się kłopotliwe i prowadzi do wzrostu

wydatków na transport. Dlatego należy spodziewać się wzrostu zainteresowania przetworzonym obornikiem, w tym obornikiem granulowanym.

Pomimo, że obornik zwierzęcy ma szerokie zastosowanie jako naturalny nawóz, jego stosowanie niesie za sobą również potencjalne ryzyko dla zdrowia ludzi i zwierząt oraz ekosystemu. Ryzyko to jest związane z zanieczyszczeniami, takimi jak bakterie chorobotwórcze i wirusy, antybiotykooporne bakterie, pozostałości leków weterynaryjnych, hormony. Niezbędna jest wiedza w zakresie skali zanieczyszczenia tego typu, dróg ich rozchodzenia się w środowisku oraz trwałości i ich losów po wprowadzeniu obornika do gleby. Badania prowadzone w Chinach wskazują, że zastosowanie obornika znacząco zwiększa udział antybiotykoopornych populacji bakterii w glebie (11). Najnowsze doniesienia literaturowe wskazują, że stosowanie egzogennej materii organicznej do gleb w postaci obornika to zagadnienia znacznie wykraczające poza kwestie składników nawozowych i bilansu węgla.

Osady ściekowe

Zgodnie z Krajowym Planem Gospodarki Odpadami produkcja osadów ściekowych miała w 2018 r. osiągnąć aż 706,6 tys. ton suchej masy osadu (4). Jakość komunalnych osadów ściekowych stosowanych w rolnictwie jest ściśle określona w rozporządzeniu Ministra Środowiska z 6 lutego 2015 r. (24). Kryteria jakościowe osadów są dość zbieżne z regulacjami stosowanymi w całej UE. Obejmują one wskaźniki jakościowe, takie jak zawartość pierwiastków śladowych (kadm, ołów, rtęć, nikiel, cynk, miedź, chrom), obecność bakterii *Salmonella* i liczba żywych jaj pasożytów jelitowych (*Ascaris* spp., *Trichuris* spp., *Toxocara* spp.). W powyższym rozporządzeniu określono również dopuszczalne dawki osadu do zastosowania w rolnictwie i rekultywacji do celów nierolniczych. Wykorzystanie osadów ściekowych w rolnictwie lub rekultywacji można uznać za alternatywną metodę odzysku substancji organicznych i składników nawozowych. Przyrost ilości osadów ściekowych produkowanych w Polsce oraz zmniejszenie dostępności nawozów naturalnych w wielu regionach przemawia za przyrodniczym stosowaniem części osadów ściekowych w rolnictwie i rekultywacji. Warunkiem dla powszechnego wykorzystania osadów w rolnictwie musi być ich dodatni wpływ na jakość gleby i znaczne wykorzystanie składników nawozowych przy braku skutków negatywnych, takich jak transfer zanieczyszczeń do roślin uprawnych i wód gruntowych lub nadmierne wzbogacenie wód gruntowych w składniki biogenne. Jak wykazały wcześniejsze badania, około 75% komunalnych osadów ściekowych wytwarzanych w Polsce spełnia obecne kryteria zawartości metali śladowych, stanowiąc potencjalne źródło wzbogacenia gleb w materię organiczną. Badania te przeprowadzono na próbie reprezentatywnej obejmującej 60 oczyszczalni o różnej wielkości, w tym na terenach przemysłowych Górnego Śląska (31). Pomimo uregulowań prawnych dotyczących stosowania osadów ściekowych w rolnictwie istnieje wiele kontrowersji i uprzedzeń ograniczających ich szersze stosowanie. Kontrowersje wynikają głównie z braku pełnej informacji odno-

śnie korzyści, zagrożeń oraz obecności zanieczyszczeń w osadach ściekowych i ich wpływu na środowisko glebowe. Dotychczasowe badania skutków stosowania osadów ściekowych do gleby dotyczyły głównie przemian składników nawozowych (azot, fosfor) i wpływu na plon (produkcyjna funkcja gleby), przy zdecydowanie mniejszej uwadze poświęcanej ich wpływowi na życie biologiczne gleby i jej bioróżnorodność. Można przypuszczać, że w niedalekiej przyszłości będzie wzrastać zainteresowanie mniej rozpoznanymi zanieczyszczeniami, które mogą się znajdować w osadach ściekowych: antybiotyki i geny antybiotykooporności, hormony, pozostałości pestycydów, nanocząstki, nanoplastiki i ich pochodne, zarówno w sferze badań naukowych, jak i w dalszej perspektywie regulacji prawnych dotyczących stosowania osadów ściekowych.

Według badań IUNG-PIB, opartych na doświadczeniach poletkowych, lizymetrycznych i szklarniowych, osady ściekowe mogą być cennym uzupełnieniem deficytów mikroelementów i magnezu w roślinach oraz mogą zwiększać zasobność gleb w fosfor i magnez przyswajalny, a ponadto po kilku latach od zastosowania zwiększają odporność gleby na fizyczną degradację. Osady ściekowe, nawet w dawkach rekultywacyjnych, stymulują aktywność i liczebność mikroorganizmów glebowych, szczególnie bakterii. Stosowanie wysokich rekultywacyjnych dawek osadów ściekowych powoduje trwałą sekwestrację węgla w glebie. Kontrolę wymaga kwestia wymywania azotanów przy wysokich rekultywacyjnych dawkach osadów, gdyż stężenie azotanów w odciekach oraz całkowite wymycie azotu w glebie nawożonej rekultywacyjnymi dawkami osadów jest nieco większe niż w przypadku nawożenia mineralnego. Jednakże dopuszczalne obecnie dawki osadów ściekowych stosowane w rolnictwie ($3 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$) nie powodują zagrożenia środowiskowego tego typu.

Oprócz zastosowania rolniczego osadów lub osadów przetworzonych na kompost lub poferment, mogą one być potencjalnie zastosowane w celu przywracania wartości użytkowych i przyrodniczych terenom zdewastowanym i zdegradowanym przez działalność człowieka oraz wykorzystane w rekultywacji składowisk, gruntów pokopalnianych lub do nawożenia trawników i innych terenów zielonych w miastach, gdyż stanowią one materiał o właściwościach użyźniających glebę i poprawiających retencję wody. Komunalne osady ściekowe okazały się efektywne w przyrodniczej zabudowie składowisk odpadów pohutniczych zawierających bardzo wysokie zawartości potencjalnie toksycznych pierwiastków, takich jak kadm i ołów (30). Przed rekultywacją składowiska te stanowiły poważne źródło wtórnego zanieczyszczenia środowiska metalami ciężkimi. Wprowadzenie pokrywy roślinnej, dzięki poprawie warunków rozwoju roślin po zastosowaniu osadów ściekowych (wprowadzenie składników nawozowych, poprawa retencji wody, uruchomienie aktywności biologicznej), ograniczało dyspersję zanieczyszczeń, a wieloletnie badania wskazują na trwały charakter rekultywacji (rys. 5).



Rys. 5. Efekt rekultywacji składowiska odpadów pohutniczych z wykorzystaniem osadu ściekowego i wapna – po lewej obszar kontrolny, po prawej obszar zrekultywowany

Źródło: Grzegorz Siebielec

Kompost

W ostatnich dziesięcioleciach ilości odpadów stałych generowanych na świecie dynamicznie wzrastały, co jest skorelowane przede wszystkim ze zwiększeniem liczby ludności. Należy podkreślić, iż nowoczesny styl życia i obecne standardy ze względu na rozwój gospodarczy i związany z nim wzrost w urbanizacji znacznie przyczyniły się do przyrostu ilości wytwarzanych odpadów, w tym również bioodpadów (7, 32). Oszacowano, że na całym świecie w 2016 roku wytworzono w miastach około 2 mld t odpadów stałych. Wiele z tych odpadów ma pochodzenie żywnościowe, stanowi zatem znaczny rezerwuuar dobrej jakości surowca do produkcji bioodpadów. Bezpośrednie zastosowanie świeżych organicznych odpadów stałych do środowiska przyrodniczego nie jest zalecane. W związku z tym technologia kompostowania jako produkcji bionawozów jest atrakcyjnym sposobem zarządzania materią organiczną i składnikami nawozowymi w cyklu zamkniętym.

Kompostowanie jest naturalnym procesem opartym na aktywności drobnoustrojów i rozkładzie martwej materii organicznej w warunkach tlenowych. Wykorzystanie kompostu jako bionawozu niesie za sobą wiele korzyści, natomiast na właściwości i efekty stosowania kompostu mają wpływ wykorzystany surowiec, sposób kompostowania, przechowywanie i stosowanie kompostu.

Sayara i in. (26) wskazują na pozytywne wyniki stosowania kompostu w rolnictwie. Generalnie, jeśli proces kompostowania przebiega prawidłowo, a kompost jest stabilny i dojrzały, to jest on cennym źródłem makro- i mikroelementów, które mogą

zastąpić nawozy syntetyczne. Niektóre badania dowiodły, że kompost wykazuje inne korzystne oddziaływania, takie jak m.in. hamowanie chorób roślin.

Kompost ma wysoką zawartość materii organicznej i z tego powodu łatwo podnosi poziom materii organicznej w glebie, co prowadzi do poprawy stabilności agregatów glebowych, lepszej zdolności zatrzymywania wody, poprawy szybkości infiltracji w glebach bardziej zwięzłych. Jedną z unikalnych cech kompostu jest obfitość drobnoustrojów, co również zwiększa aktywność mikrobiologiczną gleby wzbogaconej kompostem. Wermikompost ma jeszcze wyższą bioróżnorodność mikroorganizmów, ponieważ w procesie jego wytwarzania nie zachodzi faza wysokich temperatur. Dostępność składników nawozowych z kompostu jest dość korzystna. Część składników nawozowych, w tym azotu, jest dostępna dla roślin tuż po wprowadzeniu do gleby, pozostała pula składników jest uruchamiana stopniowo na skutek oddziaływania mikroorganizmów (21).

Wpływ kompostów na plon roślin może mieć bezpośredni charakter wynikający z uruchamiania składników nawozowych kompostu, jak również pośredni – poprzez modyfikację retencji wody w glebie lub aktywności mikroorganizmów w strefie korzeniowej. Na rysunku 6 przedstawiono efekt zastosowania kompostu w dawce $15 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ na rozwój roślin w sezonie o niedostatecznej ilości opadów.



Rys. 6. Porównanie rozwoju roślin w sezonie o niedostatecznej ilości opadów – po lewej obiekt kontrolny z przyorywaniem słomy, po prawej – poletko z zastosowanym kompostem ze słomy i osadów ściekowych

Źródło: Grzegorz Skomra

Ewentualne ryzyka związane ze stosowaniem kompostu odnoszą się do niewłaściwego bilansu składników nawozowych oraz obecności zanieczyszczeń związanych bezpośrednio z rodzajem substratu wykorzystanego do produkcji kompostu. Jeśli do

produkcji kompostu jest wykorzystywany komunalny osad ściekowy, istotne będą zagrożenia ze strony zanieczyszczeń wymienianych poprzednio w przypadku osadów ściekowych, z zastrzeżeniem, że niektóre zanieczyszczenia mogą być unieszkodliwiane w procesie kompostowania. Odpady stałe (plastik, szkło, metal, a zwłaszcza mikroplastik) stanowią specyficzny problem dla jakości kompostów, powiązany z jakością selektywnej zbiórki odpadów.

Komposty wykazują dużą przydatność do rekultywacji gleb zanieczyszczonych metalami i niwelowania negatywnych skutków zanieczyszczenia dla roślin i życia biologicznego w glebie. Ich dodatek do gleby zdecydowanie poprawia plon i zdrowotność roślin. Korzystny wpływ kompostu na rośliny jest związany nie tylko z jego sorpcyjnymi właściwościami, ale również z dostarczeniem składników nawozowych i większą dostępnością mikroelementów. Lepiej odżywione rośliny okazują się być bardziej odporne na stres chemiczny. Co istotne, kompost poprawia rozwój roślin na zanieczyszczonej glebie niezależnie od gatunku rośliny (rys. 7). Komposty powinny być aplikowane w remediacji gleb wraz z wapnem w celu przeciwdziałania spadkowi pH gleby. Korzystny jest również fakt, że dodatek kompostów zwiększał udział trudno rozpuszczalnych frakcji kadmu i ołowiu, zmniejszając ich biodostępność. Ponadto wprowadzenie kompostu poprawiało aktywność mikrobiologiczną zanieczyszczonej gleby i ograniczało akumulację kadmu w organizmach dżdżownic (27).



Rys. 7. Wpływ kompostu na rozwój różnych roślin na glebie skażonej cynkiem, ołowiem i kadmem – na każdym zdjęciu od lewej: gleba kontrolna, gleba z dodatkiem wapna, gleba z dodatkiem kompostu

Źródło: Grzegorz Siebielec

Poferment

W ostatnich latach następuje znaczny wzrost zainteresowania rozwojem energetyki opartej na produkcji biogazu. Eksploatacja biogazowni wymaga efektywnego zarządzania pofermentem, produktem ubocznym pozostającym po fermentacji beztlenowej biodegradowalnych surowców. Biogaz i poferment mogą być wytwarzane z biomasy roślinnej, produktów ubocznych rolnictwa, odpadów zwierzęcych, obornika, gnojowicy, odpadów organicznych selektywnie zbieranych (np. kuchennych). Wtórne wykorzystanie materii organicznej i składników odżywczych z pofermentu jako bionawozu jest uważane za najbardziej właściwe zagospodarowanie pofermentu. W przypadku wykorzystania w procesie fermentacji wyłącznie substratów pochodzenia roślinnego, znacznie ograniczane jest ryzyko występowania i zakres potencjalnych zanieczyszczeń w bionawozie. Wysoki potencjał nawozowy pofermentu wiąże się z dużą zawartością przyswajalnego dla roślin azotu, a także fosforu i potasu (1, 18). Wielu autorów w swoich pracach przedstawia pozytywne działanie pofermentu w porównaniu z innymi materiałami egzogennymi, takimi jak obornik (19) lub gnojowica (2, 33).

Fracja stała pofermentu składa się ze strukturalnych części materii organicznej, zawiera kwasy humusowe budujące próchnicę oraz znaczne ilości związków mineralnych. Jego aplikacja do gleby zwiększa w niej zawartość węgla, co pozytywnie wpływa na zdolności retencyjne i sorpcyjne gleby, a jednocześnie jest doskonałym źródłem składników pokarmowych dla roślin, zmniejszając tym samym zapotrzebowanie na nawozy mineralne. Frakcja płynna pofermentu zawiera substancje humusowe oraz znaczne ilości rozpuszczalnego azotu, fosforu i potasu, łatwo przyswajalnych dla roślin. W Polsce zawartość materii organicznej w pofermencie stałym wynosi 89–95%, natomiast w pofermencie płynnym 58–62% suchej masy pofermentu (14).

Materia organiczna pofermentu, podobnie jak resztki roślinne, poddawana jest w glebie procesom rozkładu i przemian. Poferment jest rozkładany w glebie przez drobnoustroje, a następnie ulega przemianom prowadzącym do powstania związków próchnicznych. Jak donoszą Cavalli i in. (6), mineralizacja węgla z przefermentowanego obornika w okresie wegetacji kształtowała się na poziomie 32–34% węgla organicznego dodanego do gleby. Był on istotnie niższy niż w przypadku obornika (51% C obornika po 181 dniach). Po jednym sezonie ta pula węgla pozostała w glebie, dlatego można założyć, że frakcja ta zostaje włączona do cyklu przemian węgla glebowego SOC, jeśli warunki w glebie nie ulegną drastycznej zmianie. Podobnie wyniki badań Beghin-Tanneau i in. (3) wskazują, że nie więcej niż 40% węgla wprowadzonego do gleby z pofermentem jest uwalniane jako CO₂ w okresie wegetacji.

Przygocka-Cyna i Grzebisz (22), opierając się na doświadczeniach polowych wskazali zalety i ograniczenia stałego pofermentu jako bionawozu. Zastosowana masa pofermentacyjna okazała się dobrym nośnikiem składników pokarmowych dla kukurydzy na ziarno, mającym duży potencjał do zastąpienia niektórych nawozów mineralnych. Poferment nie był natomiast w stanie pokryć niedoborów wszystkich

składników pokarmowych, które w intensywnie uprawianej glebie mogą występować w niedostatecznych ilościach. W opisywanych badaniach niedobór składników pokarmowych dotyczył potasu, magnezu oraz niektórych mikroelementów (żelaza i cynku).

Zalety stosowania pofermentu jako bionawozu są jednak liczne i kompleksowe. Obejmują one: wprowadzenie materii organicznej do gleby, aktywację życia biologicznego, dostarczenie azotu o różnej dostępności dla roślin, poprawę struktury gleby i odporności na erozję, ponowne wykorzystanie składników nawozowych oraz poprawę kondycji roślin.

Literatura

1. Arthurson V.: Closing the global energy and nutrient cycles through application of biogas residue to agricultural land – Potential benefits and drawbacks. *Energies*, 2009, **2**: 226-242.
2. Bachmann S., Wentzel S., Eichler-Löbermann B.: Codigested dairy slurry as a phosphorus and nitrogen source for *Zea mays* L. and *Amaranthus cruentus* L. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2011, **174**: 908-915.
3. Beghin-Tanneau R., Guérin F., Guisresse M., Kleiber D., Scheiner J.D.: Carbon sequestration in soil amended with anaerobic digested matter. *Soil & Tillage Research* 2019, **192**: 87-94.
4. Biernat J.: Zagospodarowanie komunalnych osadów ściekowych metodami termicznymi. *Inżynieria i Ochrona Środowiska*, 2012, **15(4)**: 439-449.
5. Bouwman A.F., Boumans L.J.M., Batjes N.H.: Estimation of global NH₃ volatilization loss from synthetic fertilizers and animal manure applied to arable lands and grasslands. *Global Biogeochemical Cycles*, 2002, **16(2)**: 1024.
6. Cavalli D., Corti M., Baronchelli D., Bechini L., Marino Gallina P.: CO₂ emissions and mineral nitrogen dynamics following application to soil of undigested liquid cattle manure and digestates. *Geoderma* 2017, **308**: 26-35.
7. Chen P., Xie Q., Addy M., Zhou W., Liu Y., Wang Y., Cheng Y., Yanling C., Ruan R.: Utilization of municipal solid and liquid wastes for bioenergy and bioproducts production. *Bioresource Technology*, 2016, **215**: 163-172.
8. Chenu C., Angers D.A., Barré P., Derrien D., Arrouays D., Balesdent J.: Increasing organic stocks in agricultural soils: Knowledge gaps and potential innovations. *Soil and Tillage Research*, 2019, **188**: 41-52.
9. Dębska B., Długosz J., Piotrowska-Długosz A., Banach-Szott M.: The impact of a bio-fertilizer on the soil organic matter status and carbon sequestration – results from a field-scale study. *Journal of Soils and Sediments*, 2016, **16**: 2335-2343.
10. FAO: Efficiency of soil and fertilizer phosphorus use. Reconciling changing concepts of soil phosphorus behaviour with agronomic information. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome, 2008.
11. Guo T., Lou C., Zhai W., Tang X., Hashmi M.Z., Murtaza R., Li Y., Liu X., Xu J.: Increased occurrence of heavy metals, antibiotics and resistance genes in surface soil after long-term application of manure. *Science of the Total Environment*, 2018, **635**: 995-1003.
12. Hoffland E., Kuyper T.W., Comans R.N.J., Creamer R.E.: Eco-functionality of organic matter in soils. *Plant Soil*, 2020, **455**: 1-22.
13. Komisja Europejska: Resilience and transformation. Report of the 5th SCAR Foresight Exercise Expert Group. Natural resources and food systems: Transitions towards a 'safe and just' operating space. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2020, pp. 148; <https://scar-europe.org/images/FORESIGHT/FINAL-REPORT-5th-SCAR-Foresight-Exercise.pdf>

14. K o w a l c z y k-Juśko A., Szymańska M.: Pof ferment nawozem dla rolnictwa. Fundacja na rzecz Rozwoju Polskiego Rolnictwa Warszawa, 2015, ss. 64.
15. L a l R.: Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science*, 2004, **304**: 1623-1627.
16. Moinard V., Levavasseur F., Houot S.: Current and potential recycling of exogenous organic matter as fertilizers and amendments in a French peri-urban territory. *Resources, Conservation and Recycling*, 2021, **169**: 105523.
17. Mondini C., Cayuela M.L., Sinicco T., Fornasier F., Galvez A., Sánchez-Monedero M.A.: Soil C storage potential of exogenous organic matter at regional level (Italy) under climate change simulated by RothC model modified for amended soils. *Frontiers of Environmental Science*, 2018, **6**: 144.
18. Möller K., Müller T.: Effects of anaerobic digestion on digestate nutrient availability and crop growth. *Engineering in Life Sciences*, 2012, **12**: 242-257.
19. Odlaire M., Pell M., Svensson K.: Changes in soil chemical and microbiological properties during 4 years of application of various organic residues. *Waste Management*, 2008, **28**: 1246-1253.
20. Prokop G., Jobstmann H., Schönbauer A.: Report on best practices for limiting soil sealing and mitigating its effects. Publisher: European Commission, Brussels, Technical Report 2011, pp. 231.
21. Projekt Best4soils. Factsheets. Kompost - zalety i wady. www.best4soil.eu
22. Przygocka-Cyna K., Grzebisz W.: Biogas digestate – benefits and risks for soil fertility and crop quality – an evaluation of grain maize response. *Open Chem.* 2018, **16**: 258-271.
23. Rayne N., Aula L.: Livestock manure and the impacts on soil health: a review. *Soil Systems* 2020, **4**: 64.
24. Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 6 lutego 2015 r. w sprawie komunalnych osadów ściekowych (Dz.U. 2015, nr 0, poz. 257).
25. Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2019/1009 z dnia 5 czerwca 2019 r. ustanawiające przepisy dotyczące udostępniania na rynku produktów nawozowych UE, zmieniające rozporządzenia (WE) nr 1069/2009 i (WE) nr 1107/2009 oraz uchylające rozporządzenie (WE) nr 2003/2003
26. Sayara T., Basheer-Salimia R., Hawamde F., Sánchez A.: Recycling of organic wastes through composting: process performance and compost application in agriculture. *Agronomy* 2020, **10**: 1838.
27. Siebielec G.: Ocena skuteczności rekultywacji gleb zanieczyszczonych metalami na podstawie reakcji różnych elementów środowiska glebowego. Raport końcowy projektu MNiSZW nr 2P04G06130, 2009, ss. 68.
28. Siebielec G., Łopatka A., Smreczak B., Kaczyński R., Siebielec S., Koza P., Dach J.: Materia organiczna w glebach mineralnych Polski. Zagrożenia dla jakości gleb w Polsce – część II. *Studia i Raporty IUNG-PIB*, 2020, **64(18)**: 9-30.
29. Siebielec G., Łopatka A.: Kryteria wyodrębniania oraz charakterystyka obszarów specyficznych. W: *Rolnictwo na obszarach specyficznych*, M. Matyka (red.). GUS, Warszawa, 2013, s. 8-15.
30. Siebielec S., Siebielec G., Stuczynski T., Sugier P., Grzęda E., Grządziel J.: Long term insight into biodiversity of a smelter wasteland reclaimed with biosolids and by-product lime. *Science of the Total Environment*, 2018, **636**: 1048-1057.
31. Siebielec G., Stuczynski T.: Metale śladowe w komunalnych osadach ściekowych wytwarzanych w Polsce. *Proceedings of ECOpole*, 2008, **2(2)**: 479-484.
32. Soobhany N.: Insight into the recovery of nutrients from organic solid waste through biochemical conversion processes for fertilizer production: A review. *Journal of Cleaner Production* 2019, **241**: 118413.

33. Wentzel S., Joergensen R.G.: Quantitative microbial indices in biogas and raw cattle slurries. *Engineering in Life Sciences*, 2016, **16**: 231-237.
34. <https://stat.gov.pl/>
-

Adres do korespondencji:

dr hab. Grzegorz Siebielec, prof. IUNG-PIB
Zakład Gleboznawstwa Erozji i Ochrony Gruntów
IUNG-PIB
ul. Czartoryskich 8
24-100 Puławy
tel. 81 4786918
e-mail: gs@iung.pulawy.pl

AUTOR	ORCID
Grzegorz Siebielec	0000-0001-8089-6123
Sylwia Siebielec	0000-0001-9516-1939
Radosław Kaczyński	0000-0002-2427-9099
Piotr Koza	0000-0002-0243-7631