

**Grzegorz Siebielec¹, Artur Łopatka¹, Bożena Smreczak¹,
Radosław Kaczyński¹, Sylwia Siebielec¹, Piotr Koza¹, Jacek Dach²**

*¹Instytut Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa – Państwowy Instytut Badawczy
w Puławach*

²Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu

MATERIA ORGANICZNA W GLEBACH MINERALNYCH POLSKI*

Słowa kluczowe: próchnica, węgiel organiczny, egzogenna materia organiczna, zmianowanie, profile wzorcowe, monitoring gleb

Rola materii organicznej w glebie

Materia organiczna gleby, której najbardziej znaczącą część stanowi próchnica glebowa, jest składnikiem gleby o bardzo dużym znaczeniu dla jej funkcjonowania. Zawartość materii organicznej to jeden z głównych wskaźników jakości środowiska glebowego, co wynika z roli materii organicznej w kształtowaniu właściwości fizycznych (gęstość, stabilność agregatów, retencja wody), fizycznochemicznych/chemicznych (wymiana jonowa, właściwości buforowe, rozpuszczalność i migracja pierwiastków, detoksykacja środowiska, źródło makro- i mikroelementów dla roślin) i biologicznych gleby (dostarczanie składników pokarmowych i energii dla mikroorganizmów, biostymulacja wzrostu i rozwoju roślin, regulacja bioróżnorodności). Ważna jest jej rola strukturotwórcza – zlepiając cząstki mineralne odpowiada za tworzenie właściwej, agregatowej struktury gleby, co z kolei pozytywnie wpływa na jej napowietrzenie, przepuszczalność, pojemność wodną i zwięzłość. Próchnica glebowa, wchodząca w skład materii organicznej, bierze udział w procesach sorpcji wymiennej i regulowaniu buforowych właściwości gleby. Związki próchnicowe, tj. kwasy humusowe czy fulwowe, wpływają na rozpuszczalność i migrację jonów metali, mogą zatem zarówno zwiększać dostępność niektórych pierwiastków potrzebnych roślinom (mikroelementów), jak i zmniejszać dostępność szkodliwych zanieczyszczeń. Związki humusowe mają zdolność do wiązania nie tylko mineralnych składników gleby, ale także cząsteczek zanieczyszczeń organicznych, jak np. środków ochrony roślin, oraz

* Opracowanie wykonano w ramach zadania 1.1 w programie wieloletnim IUNG-PIB.

zanieczyszczeń uwalnianych do środowiska z przemysłu, m.in. polichlorowanych bifenyli (PCB) oraz wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych (WWA).

Niezwykle istotną rolę glebowej materii organicznej jest przeciwdziałanie suszy. Rola ta jest związana z właściwościami retencyjnymi samej materii organicznej, a dodatkowo prawidłowa struktura gleby, zależna od materii organicznej, sprzyja zatrzymywaniu większych ilości wody w glebie. Większa odporność gleb o wysokiej zawartości próchnicy na zagęszczenie gleby ogranicza spływ wody deszczowej po powierzchni gleby, zwiększając stopień jej wykorzystania przez rośliny. Próchnica ma dodatni wpływ na aktywność mikroorganizmów wspomagających rośliny w okresach suszy, powodując większą odporność roślin uprawnych, co wynika z interakcji pomiędzy roślinami i mikroorganizmami w strefie korzeniowej. Mikroorganizmy mogą wspomagać odporność roślin na suszę poprzez np. produkcję polisacharydów poprawiających strukturę gleby, syntezę deaminaz, produkcję kwasu indoliloctowego i proliny, poprawę cyrkulacji wody przez grzyby itd. (9).

Celem pracy było omówienie wpływu różnych praktyk rolniczych na zawartość materii organicznej w glebie, potencjału wykorzystania egzogennej materii organicznej oraz zmian zawartości materii organicznej w skali regionalnej i krajowej.

Wpływ praktyk rolniczych na zmiany zawartości materii organicznej w glebie

Spośród czynników, które w największym stopniu wpływają na zawartość próchnicy w glebie należy wymienić: a) sposób użytkowania gruntu (leśny, rolny, łąkowy); b) intensywność rolnictwa tj. rodzaj i intensywność zabiegów agrotechnicznych, płodozmian i wysokość plonów; c) gospodarka resztkami pożywnymi; d) poziom nawożenia organicznego.

W ostatnich latach w niektórych regionach kraju został odnotowany wzrost udziału gospodarstw bezinwentarzowych, a więc pozbawionych nawożenia organicznego obornikiem. Następuje koncentracja produkcji zwierzęcej w niektórych regionach, np. w województwach podlaskim i warmińsko-mazurskim. Z kolei w innych regionach (tj. województwa: małopolskie, podkarpackie, lubelskie) występuje znaczny deficyt nawozów naturalnych (obornik) wynikający z zaniechania produkcji zwierzęcej, co grozi negatywnym bilansem materii organicznej w glebie. Zawartość materii organicznej w glebie jest również uwarunkowana rodzajem zmianowań, co wiąże się z ilością pozostających na polu resztek pozbiorowych. Do roślin próchnico-twórczych, a więc takich, których uprawa wzbogaca glebę w materię organiczną zalicza się trawy oraz rośliny bobowate. Dużo mniejsze ilości resztek pozbiorowych wnoszą do gleby zboża, szczególnie w przypadku gdy słoma nie jest przyorywana, a najmniejsze – rośliny okopowe. Podstawowym warunkiem poprawnego gospodarowania w rolnictwie jest utrzymanie dodatniego lub przynajmniej zrównoważonego bilansu glebowej materii organicznej (próchnicy).

Resztki roślinne oraz nawozy naturalne i organiczne ulegają w glebie rozkładowi przez mikroorganizmy, a następnie podlegają przemianom prowadzącym do powstania związków próchnicowych. Oprócz negatywnego bilansu materii organicznej

wynikającego z niewłaściwego zmianowania roślin i niedostatku nawożenia naturalnego, zasadniczym czynnikiem przyczyniającym się do spadku zawartości próchnicy jest zmiana stosunków wilgotnościowych i obniżenie poziomu lustra wody gruntowej w glebach o opadowo-gruntowym typie zasilania w wodę.

Do głównych praktyk powodujących ubytek materii organicznej w glebie zaliczane są:

- zmiana sposobu użytkowania z naturalnego (leśnego, łąkowego) na orny;
- zaniechanie stosowania obornika, gnojowicy, nawozów zielonych, kompostów;
- duża liczba zabiegów uprawowych powodujących nadmierne napowietrzenie gleby intensyfikujące rozkład materii organicznej;
- intensyfikacja uprawy, wprowadzanie uproszczonego zmianowania z dominacją zbóż (szczególnie monokultur zbożowych);
- zbiór słomy zbóż i przeznaczanie jej na inne cele niż przyoranie.

Z kolei do praktyk zapewniających dodatni bilans materii organicznej w glebie należą:

- przyorywanie słomy i zielonego nawozu;
- uprawa poplonów i międzyplonów;
- uprawa roślin bobowatych;
- stosowanie nawozów naturalnych (obornik) i organicznych (np. kompost);
- uproszczenia w uprawie roli (11).

Istotny wpływ na zasoby materii organicznej w glebach ma również sposób uprawy roli. Zamiana tradycyjnego sposobu uprawy roli (orkowego) na system bezorkowy lub z ograniczoną liczbą zabiegów uprawowych pozwala zwiększyć zasoby materii organicznej (16). Uproszczenia w uprawie roli zmniejszają zakłócenia profilu glebowego, ograniczają napowietrzanie gleby sprzyjające degradacji materii organicznej oraz chronią strukturę gleby. Uprawa uproszczona lub bezorkowa powodują jednak akumulację próchnicy węgla wyłącznie w przypadku wieloletniego stosowania. Pośrednio na poziom materii organicznej w glebie wpływają również:

- regulacja odczynu gleby,
- zabezpieczenie gleby przed erozją.

Potencjalne egzogenne źródła węgla w glebie oraz korzyści i ryzyko związane z ich stosowaniem

Niedobór materii organicznej w glebie wynikający z przyjętego zmianowania i sposobu wykorzystania resztek poźniwnych można uzupełniać ze źródeł egzogennych. Dobrym źródłem materii organicznej są nawozy naturalne. Obornik to tradycyjny nawóz naturalny składający się z odchodów (kału i moczu) zwierząt gospodarskich oraz ściółki. Skład chemiczny obornika może być zróżnicowany, w zależności od gatunku i wieku zwierząt, sposobu ich żywienia oraz jakości skarmianej paszy, od ilości stosowanej ściółki oraz stopnia przefermentowania materiału. Stosowanie obornika na gruntach ornych jest powszechnie uważane za właściwy

i niedrogi sposób postępowania z odpadami zwierzęcymi. Obornik jako nawóz należy stosować racjonalnie – zgodnie z zaleceniami dobrej praktyki rolniczej dawka nawozu naturalnego (obornik, gnojówka i gnojowica) na 1 ha użytków rolnych w ciągu roku nie może przekroczyć $170 \text{ kg N} \cdot \text{ha}^{-1}$ (6). Dotychczasowe badania dotyczące obornika z reguły dotyczyły stopnia wykorzystania przez rośliny składników nawozowych (azot, fosfor), wpływu na plon lub ryzyka wymywania biogenów z gleby. Należy mieć jednak świadomość, że obornik, może zawierać szereg, często nierozpoznanych dotychczas zanieczyszczeń: antybiotyki, metale, hormony, pozostałości pestycydów. Najnowsze nieliczne jeszcze doniesienia wskazują, że obornik może być rezerwuarem antybiotykoopornych bakterii i pozostałości farmaceutyków. Badania prowadzone w Chinach wskazują, że jego zastosowanie do gleb rolniczych znacząco zwiększa ilość ARG (ang. *antibiotic resistance genes*) i udział antybiotykoopornych populacji bakterii w glebie (3). Duża ilość metali i antybiotyków jest corocznie wykorzystywana w koncentratkach do żywienia zwierząt na całym świecie, w leczeniu chorób zwierzęcych i promowaniu wzrostu zwierząt oraz w celach profilaktycznych i terapeutycznych w hodowli zwierząt. Stosowanie antybiotyków zostało zakazane w Unii Europejskiej od 2006 r., a w USA ich wykorzystanie w celach nieterapeutycznych zostało wstrzymane. Jednak w niektórych krajach nadal dość powszechnie używa się antybiotyków w produkcji zwierzęcej.

Intensywny rozwój gospodarki, w tym modernizacja i budowa nowych oczyszczalni ścieków, a także rozbudowa sieci kanalizacyjnej, spowodowały zwiększenie produkcji osadów ściekowych w Polsce. Zgodnie z Krajowym planem gospodarki odpadami produkcja osadów ściekowych miała w 2018 r. osiągnąć aż 706,6 tys. ton suchej masy osadu (1). Jakość komunalnych osadów ściekowych stosowanych w rolnictwie określa rozporządzenie Ministra Środowiska z 6 lutego 2015 r. Kryteria obejmują wskaźniki jakości, 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 rozporządzeniu określono również roczne lub skumulowane 2-, 3-letnie dawki osadu dopuszczalne do zastosowania w rolnictwie i rekultywacji do celów nierolniczych. Wykorzystanie osadów ściekowych w rolnictwie lub rekultywacji można uznać za alternatywną metodę recyklingu substancji organicznych i składników nawozowych. Średnio osady komunalne wytwarzane w Polsce zawierają 2,6% azotu (N) i 1,83% fosforu (P) w suchej masie (15), stanowiąc znaczny rezerwuár tych składników nawozowych. Dla przykładu, zakładając prognozowaną produkcję osadów ściekowych w kraju na poziomie 706,6 tys. ton, mogą one zawierać prawie 18,5 tys. ton N i 13 tys. ton P. Ilość ta teoretycznie mogłaby zastąpić nawozy mineralne P na obszarze 618 tysięcy hektarów użytków rolnych (6,2% ogólnej powierzchni gruntów ornych), zakładając średnie dawki nawożenia P w Polsce. Wieloletnie badania skutków stosowania osadów ściekowych prowadzone w Zakładzie Gleboznawstwa Erozji i Ochrony Gruntów IUNG-PIB wskazują na następujące uogólnienia:

- aplikacja dogłębowa osadów ściekowych powoduje wzrost plonowania roślin uprawnych;

- pewne ryzyko jest związane ze stężeniem azotanów w odciekach z gleb i ich całkowitym wymyciem, z czego wynika konieczność ograniczeń w dawkach osadu i potrzeba ich dostosowania do właściwości gleby;
- małe stężenia pierwiastków śladowych w odciekach z profilu glebowego nie powodują zagrożeń dla środowiska i jakości zasobów wodnych;
- osady ściekowe mogą uzupełniać deficyty mikroelementów i magnezu w roślinach oraz zwiększać zasobność gleb w fosfor i magnez przyswajalny;
- wprowadzenie osadów ściekowych zwiększa odporność gleby na fizyczną degradację;
- dawki osadu nieprzekraczające $30 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ nie powodują nadmiernego nagromadzenia kadmu w roślinach;
- stosowanie rekultywacyjnych dawek osadów ściekowych powoduje trwałą sekwestrację węgla w glebie;
- osady ściekowe z reguły stymulują aktywność i liczebność mikroorganizmów glebowych, szczególnie bakterii;
- dopuszczalne aktualnie dawki osadów ściekowych stosowane w rolnictwie oraz obecne kryteria jakości osadów nie powodują żadnego zagrożenia środowiskowego ze strony potencjalnie toksycznych pierwiastków, takich jak arsen, kadm i ołów (12, 13).

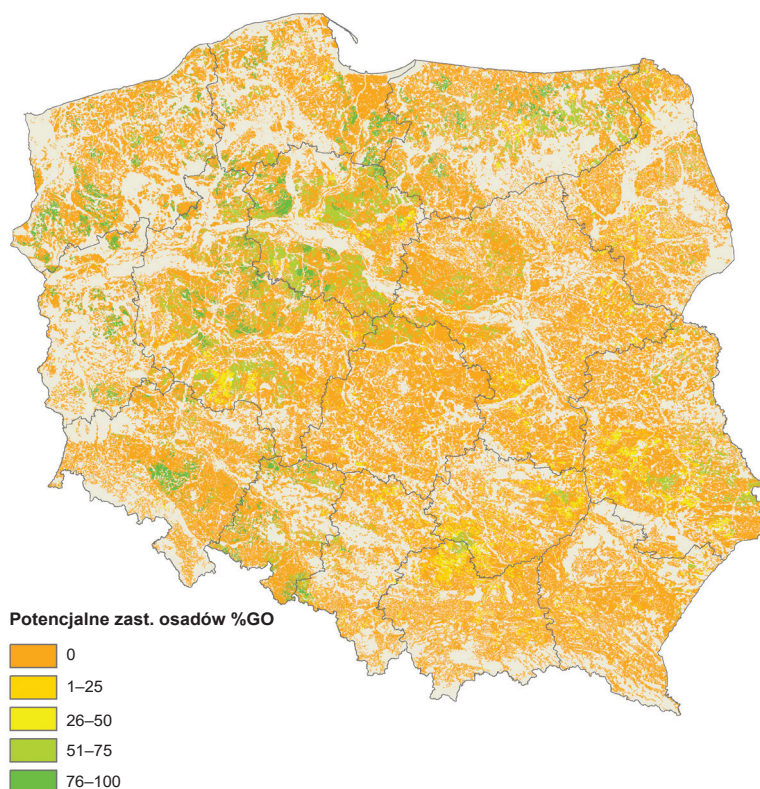
Należy jednak mieć świadomość, że komunalne osady ściekowe mogą zawierać szereg często nierozpoznanych dotychczas zanieczyszczeń, takich jak: antybiotyki i inne farmaceutyki, antybiotykooporne bakterie, hormony, nanocząstki, mikroplastiki, związki towarzyszące plastikom. Kwestia poziomu zawartości tych zanieczyszczeń i ewentualnego ryzyka związanego z nimi wymaga szczegółowych badań. W tej sytuacji może wzrastać rola osadów ściekowych z przemysłowych oczyszczalni ścieków przemysłu spożywczego, które są odizolowane od większości wymienionych zanieczyszczeń. Zarówno komunalne osady ściekowe i osady ściekowe z przemysłu spożywczego mogą być substratami do produkcji bionawozów organicznych.

W celu określenia potencjału wykorzystania komunalnych osadów ściekowych w rolnictwie przyjęto założenie, że osady będą konkurować w tym zakresie jedynie z nawozami naturalnymi (obornik, gnojowica). Nie uwzględniono ograniczeń wynikających z kosztów transportu i dystrybucji osadów na polach. Uwzględniono natomiast następujące ograniczenia:

- osady będą stosowane tylko na gruntach ornych (GO) – warunek ten wynika zarówno z obowiązujących przepisów, jak i zagrożeń środowiskowych, jakie mogłoby powodować stosowanie osadów ściekowych na użytkach zielonych, które są położone często na obszarach o znacznym nachyleniu lub o wysokim poziomie wód gruntowych;
- osady nie powinny być stosowane na glebach bardzo lekkich o wysokiej przewodności hydraulicznej i niskiej pojemności retencyjnej, z których składniki takie jak azot i fosfor są łatwo wypłukiwane z gleby;
- osady powinny być stosowane na glebach o niskiej zawartości próchnicy $<2\%$;

- osady nie mogą być stosowane na glebach o odczynie $\text{pH} < 5,6$, zgodnie z obowiązującymi przepisami, ze względu na ryzyko środowiskowe występujące w związku z uwalnianiem z nich metali śladowych w warunkach kwaśnego odczynu;
- osady nie mogą być stosowane na obszarach, gdzie poziom wód gruntowych znajduje się w przedziale 0–2 m – ze względu na ryzyko transferu biogenów i zanieczyszczeń do wód;
- osady nie mogą być stosowane na obszarach NATURA 2000;
- osady nie będą stosowane przez gospodarstwa o powierzchni poniżej 10 ha ze względu na stosunkowo dużą uciążliwość procedury administracyjnej w stosunku do spodziewanych korzyści.

Analiza wykazała, że potencjalne obszary zastosowania osadów ściekowych obejmują 8,4% powierzchni GO w Polsce, co stanowi obszar około 0,905 mln ha. Są one silnie rozproszone przestrzennie, a ich większe skupiska występują na północnym zachodzie kraju, w szczególności w województwie kujawsko-pomorskim (rys. 1).



Rys. 1. Przestrzenny rozkład gruntów ornych o dużym potencjale wykorzystania osadów ściekowych do nawożenia gleb

Źródło: opracowanie własne

W ostatnich latach wzrasta również produkcja biodegradowalnych odpadów, które potencjalnie mogą stanowić alternatywne źródła materii organicznej do nawożenia gleb i rekultywacji. Wśród odpadów organicznych, które są dopuszczone do stosowania zgodnie z metodą odzysku R10 (Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 20 stycznia 2015 r. w sprawie procesu odzysku R10), czyli rozprowadzania na powierzchni gleby w celu nawożenia lub jej ulepszenia, znajdują się między innymi: osady z oczyszczania stawów służących do hodowli i chowu ryb, odpady z gospodarki leśnej, grzybnia pochodząca z hodowli pieczarek, wytloki i inne odpady z przetwórstwa produktów roślinnych, wytloki, osady moszczowe i pofermentacyjne, wywary (niezawierające części mineralnych), odpady ulegające biodegradacji z pielęgnacji terenów zielonych, materiał po procesie kompostowania, przefermentowane odpady z beztlenowego rozkładu gnojowicy, odpadów roślinnych i zwierzęcych. Ich zastosowanie do nawożenia gleb wymaga uzyskania zezwolenia powiatowego wydziału ochrony środowiska, po uprzednim wykonaniu badań zawartości zanieczyszczeń w odpadzie i glebie pobranej z docelowego pola.

W kraju ilość odpadu z produkcji pieczarek kształtuje się na poziomie 1500 tys. ton, stanowiąc znaczny potencjał w zakresie nawożenia gleb (4). Odpady te mogą zawierać około 30% węgla organicznego, 2% azotu i 0,5% fosforu (8). Brak jest natomiast danych na temat wielkości krajowej produkcji osadów z oczyszczania stawów służących do hodowli i chowu ryb. Określa się, że ilość uwodnionych osadów z jednego stawu może wynosić 15 t (19). Brak jest również danych w odniesieniu do ilości wytlóków z przetwórstwa produktów roślinnych, przy czym wiadomo, że odpady te mogą stanowić średnio 25–35% masy surowca wsadowego. Jest to odpad łatwo degradowalny, dlatego może znaleźć szczególne zastosowanie jako surowiec w produkcji biogazu oraz pofermentu jako produktu ubocznego.

Wielkość produkcji pofermentu, który jest odpadem przy produkcji biogazu stale wzrasta w Polsce. Co istotne, w trakcie procesu fermentacji substraty wyjściowe podlegają niewielkim stratom składników nawozowych. Bardziej ekonomicznie i środowiskowo uzasadnione jest, aby odpady powstające w rolnictwie i przemyśle rolno-spożywczym były poddawane procesowi fermentacji, a jako nawóz wykorzystywano pulpę pofermentacyjną (2). Poferment może być wartościowym bionawozem, z uwagi na wysoką zawartość i przyswajalność azotu oraz, w przypadku pofermentu stałego, dość wysoką zawartość materii organicznej. Wykorzystanie w rolnictwie pofermentu podlega jednak obecnie tym samym ograniczeniom co inne odpady biodegradowalne i jest dopuszczalne zgodnie z przepisami wspomnianego wcześniej rozporządzenia dotyczącego odzysku metodą R10. Według danych Rejestru wytwórców biogazu rolniczego, obecnie w Polsce funkcjonuje 114 biogazowni rolniczych. Substraty do produkcji biogazu można podzielić na 3 grupy:

- odpady z produkcji zwierzęcej (np. gnojowica, obornik);
- uprawy energetyczne (np. kiszonka z kukurydzy, sianokiszonka, zboże);
- odpady z przemysłu rolno-spożywczego (np. wywar gorzelniany, serwatka, wysłodki, pulpa ziemniaczana, resztki owoców i warzyw).

Kompostowanie, czyli autotermiczny i termofilowy rozkład bioodpadów jest bardzo dobrym sposobem na poprawę ich jakości przed zastosowaniem do nawożenia. Proces ten zachodzi przy udziale mikroorganizmów w obecności tlenu, dzięki czemu odpady ulegają stabilizacji, następuje likwidacja patogenów, a sam kompost można łatwiej magazynować, transportować i rozprowadzać na polu (2).

Jedną z potencjalnych strategii sekwestracji węgla w glebie jest zastosowanie biowęgla. Biowęgiel produkowany jest w procesach traktowania biomasy (drewno, rośliny energetyczne, słoma, odpady drzewne, papier, bioodpady) wysoką temperaturą przy ograniczonym dostępie tlenu. Na obecnym etapie rozwoju technologii produkcja biowęgla jest w fazie startowej, zatem nie stanowi alternatywy dla innych materiałów organicznych. Należy jednak przypuszczać, że z biegiem czasu pojawią się tańsze technologie produkcji biowęgla lub toryfikatu, zwiększające również potencjał ich wykorzystania w rolnictwie. Zastosowanie biowęgla na szerszą skalę będzie wymagało również oceny ich wpływu na środowisko glebowe ze względu na wysoką zawartość WWA w niektórych produktach pirolizy.

Należy wspomnieć, że wszystkie wymienione potencjalne źródła egzogennej materii organicznej, poza obornikiem, mogą być wprowadzone na rynek nawozowy jedynie po uzyskaniu statusu nawozu lub środka poprawiającego właściwości gleby. W przeciwnym razie zachowują status odpadu i podlegają wymienionym wcześniej przepisom regulującym ich rolnicze lub rekultywacyjne wykorzystanie.

Poziom zawartości materii organicznej w glebach mineralnych w Polsce

Naturalna zawartość materii organicznej w glebach Polski uzależniona jest od czynników naturalnych, takich jak: typ gleby i jej uziarnienie (gatunek), położenie w rzeźbie terenu i stosunki wodne, charakter szaty roślinnej porastającej teren, na które nakłada się wpływ gospodarki człowieka. W Polsce ze względu na zawartość substancji organicznej w poziomie orno-próchnicznym wyróżnia się 4 klasy zasobności w próchnicę:

- <1% – niska;
- 1–2% – średnia;
- 2–3,5% – wysoka;
- >3,5% – bardzo wysoka.

Gleby Polski zawierają stosunkowo mało materii organicznej, gdyż w pokrywie glebowej dominują gleby lekkie wytworzone piasków różnego pochodzenia. Są one przewiewne, a niektóre z nich trwale za suche. Charakteryzują się niską zawartością frakcji koloidalnej (<0,002 mm), co nie sprzyja akumulacji próchnicy w glebach, a procesy mineralizacji związków organicznych są potęgowane przez obserwowane w ostatnich latach niedobory opadów.

Najobszerniejsze przestrzenne bazy danych o zawartości materii organicznej w glebach pochodzą z:

- programu ocena stanu ekologicznego gleb użytków rolnych Polski realizowanego w latach 90. XX w. (1992–1997), obejmującego około 44 tysięcy profili pobranych na UR (17, 18);
- programu monitorowania wpływu instrumentów polityki rolnej na jakość gleb, realizowanego w ramach zadania 1.3 programu wieloletniego IUNG-PIB 2016–2020 „Monitorowanie różnych parametrów środowiska glebowego dla właściwej oceny WPR”. Program obejmował około 41 tysięcy lokalizacji na terenie całego kraju. Prace w ramach zadania pozwoliły na ocenę zmian parametrów środowiska glebowego zarówno w ujęciu dynamicznym (w latach) przez porównania do wcześniejszych okresów, jak i w ujęciu przestrzennym (<http://pw.iung.pl/>).

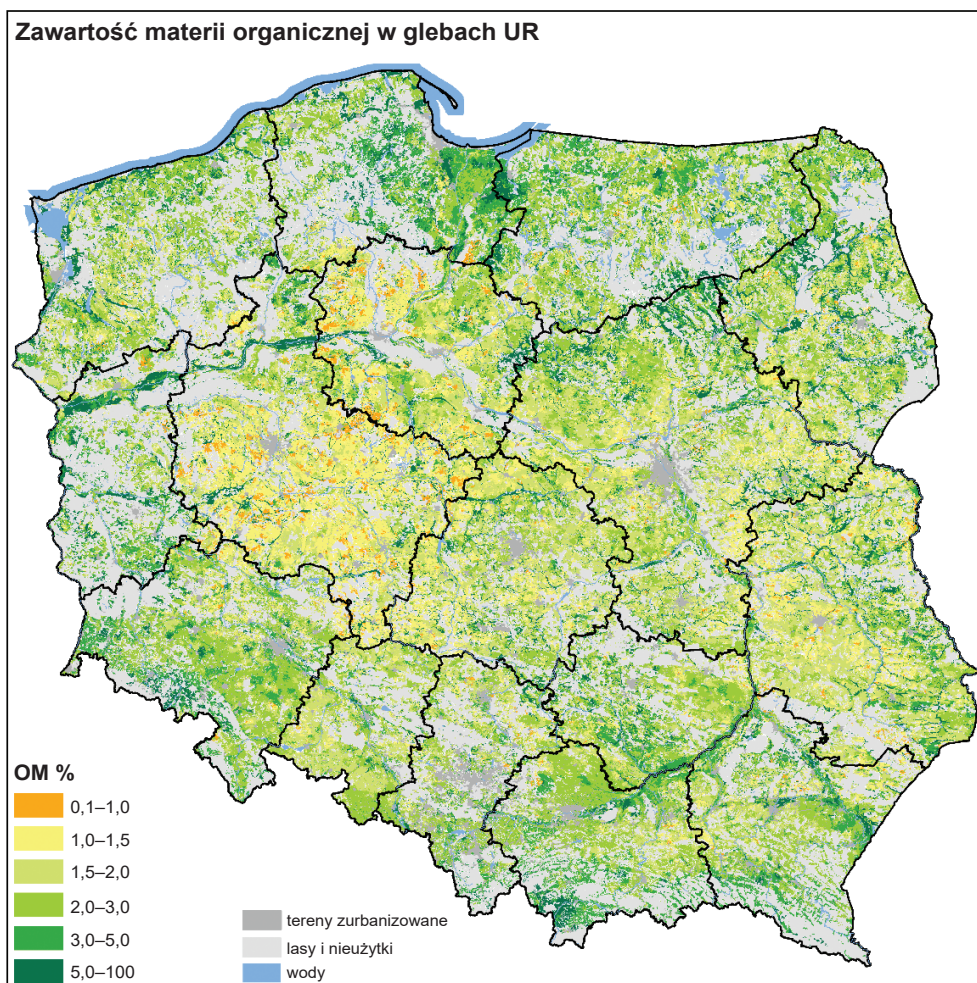
W przypadku obu programów prace terenowe i analizy właściwości chemicznych gleb a w programie oceny stanu ekologicznego gleb użytków rolnych Polski również analizy roślin, były wykonywane w stacjach chemiczno-rolniczych, a koordynację merytoryczną nad programami oraz integrację i analizę danych prowadził Instytut Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa – PIB w Puławach.

Na rysunkach 2 i 3 przedstawiono mapy zawartości materii organicznej w glebach użytków rolnych na podstawie programu badań odpowiednio: z lat 1992–1997 oraz 2016–2020. Obie bazy danych wykazują znaczną zmienność zawartości materii organicznej w glebach oraz dość zbliżony układ przestrzenny gruntów z niską zawartością materii organicznej, przy czym bardziej aktualne dane (z lat 2016–2020) wskazują na nieco gorszą sytuację w glebach województwa wielkopolskiego oraz mniejszy udział gleb o niskiej zawartości próchnicy w województwach mazowieckim i świętokrzyskim, w porównaniu z danymi historycznymi.



Rys. 2. Mapa zawartości materii organicznej w glebach użytków rolniczych Polski na podstawie programu badań z lat 1992–1997

Źródło: opracowanie własne



Rys. 3. Mapa zawartości materii organicznej w glebach użytków rolniczych Polski na podstawie programu badań z lat 2016–2020

Źródło: opracowanie własne

Porównując poszczególne województwa, najwyższe przeciętne zawartości materii organicznej w glebach gruntów ornych występują w województwach: lubuskim, pomorskim oraz małopolskim a najniższe – w wielkopolskim, kujawsko-pomorskim, lubelskim i łódzkim, w których mediana zawartości jest niższa niż 1,7% (tab. 1).

Przeciętna zawartość materii organicznej w glebach trwałych użytków zielonych w dużym stopniu zależy od udziału użytków zielonych położonych na glebach pochodzenia organicznego i jest najwyższa w województwach: podlaskim, zachodniopomorskim i pomorskim (tab. 1)

Tabela 1

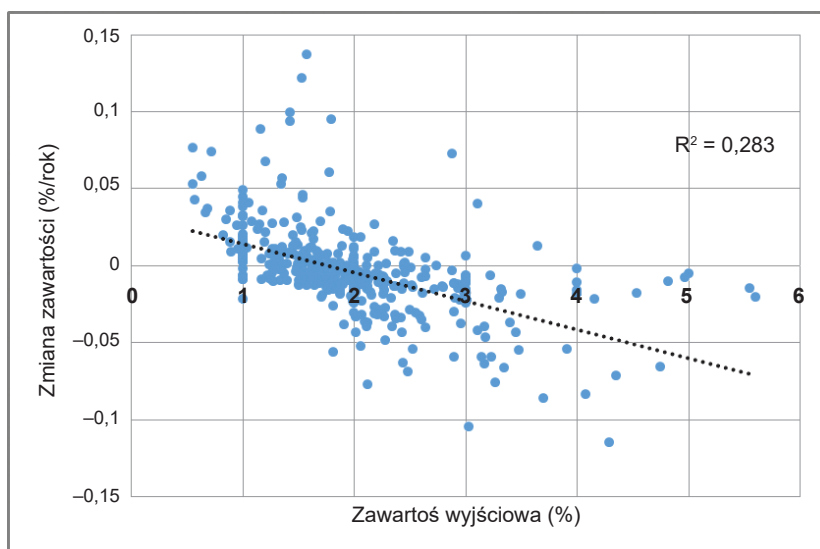
Przeciętne zawartości materii organicznej (w %) w glebach na podstawie programu badań z lat 2016–2020

Województwo	Grunty orne		Trwałe użytki zielone	
	średnia zawartość	mediana zawartości	średnia zawartość	mediana zawartości
Dolnośląskie	2,54	2,35	5,03	3,48
Kujawsko-pomorskie	1,95	1,64	20,96	23,13
Lubelskie	1,84	1,69	27,86	6,73
Lubuskie	3,14	2,53	19,58	8,30
Łódzkie	1,87	1,69	24,89	21,86
Małopolskie	2,84	2,42	5,33	3,70
Mazowieckie	2,00	1,78	21,71	6,70
Opolskie	2,07	1,91	4,85	2,57
Podkarpackie	2,62	2,34	9,22	3,51
Podlaskie	2,22	1,99	44,38	51,10
Pomorskie	3,11	2,72	29,69	30,16
Śląskie	2,34	2,08	7,09	3,32
Świętokrzyskie	2,38	2,12	13,10	4,28
Warmińsko-mazurskie	2,78	2,34	32,07	27,47
Wielkopolskie	1,65	1,40	17,48	12,46
Zachodniopomorskie	2,38	2,13	37,09	39,68
POLSKA	2,26	1,98	22,27	16,99

Zmiany zawartości materii organicznej w glebach mineralnych

Wieloletnie zmiany zawartości materii organicznej w profilach wzorcowych

Ocenę trendów zmian zawartości materii organicznej w wierzchniej warstwie gleb gruntów ornych wykonano na podstawie analizy profili wzorcowych z województw: podlaskiego, lubelskiego, wielkopolskiego oraz dolnośląskiego (razem 570 profili). Dane historyczne o zawartości materii organicznej w profilach o znanym położeniu geograficznym pochodziły z lat 1960–1980, a ponowną analizę w tych samych lokalizacjach wykonano w okresie 2010–2019. Analiza danych wykazała, że spadek zawartości materii organicznej na przestrzeni ostatnich 30–50 lat dotyczył głównie gleb o wyższej początkowej jej zawartości (rys. 4). Regresja liniowa dla zależności pomiędzy wyjściową zawartością materii organicznej a tempem zmian zawartości wskazuje, że punkt równowagi znajduje się przy zawartości materii organicznej na poziomie 1,5–2,0%. Tempo zmiany zawartości materii organicznej kształtowało się w zakresie od 0,12% straty do 0,13% akumulacji w ciągu roku, jednak w zdecydowanej większości lokalizacji zmiana zawartości mieściła się w zakresie od – 0,05 do 0,05%.



Rys. 4. Kierunek i zakres zmian zawartości materii organicznej w glebach województw: podlaskiego, lubelskiego, dolnośląskiego i wielkopolskiego w zależności od zawartości początkowej

Źródło: opracowanie własne

W zdecydowanej większości profili o początkowej zawartości materii organicznej powyżej 2% zanotowano spadek zasobności. Jedynie w kilkunastu profilach tej grupy gleb stwierdzono wzrost zawartości materii organicznej. W grupie profili o zawartości wyjściowej 1,5–2,0%, która stanowiła ponad 40% wszystkich profili, jedynie 1/3 gleb podlegała procesowi akumulacji materii organicznej. Przyrosty zawartości obserwowano natomiast w większości gleb o zawartości początkowej poniżej 1,5% s.m. gleby.

We wszystkich województwach objętych badaniami porównawczymi zanotowano wzrost udziału gleb o średniej zawartości materii organicznej (1–2% s.m. gleby), głównie kosztem gleb o wyjściowej wysokiej zawartości (2–3,5% s.m.) (tab. 2). Udział gleb o zawartości powyżej 3,5% pozostawał na dość zbliżonym poziomie, podczas gdy liczba gleb najmniej zasobnych (poniżej 1% s.m.) zmniejszyła się w województwach podlaskim i dolnośląskim.

Tabela 2

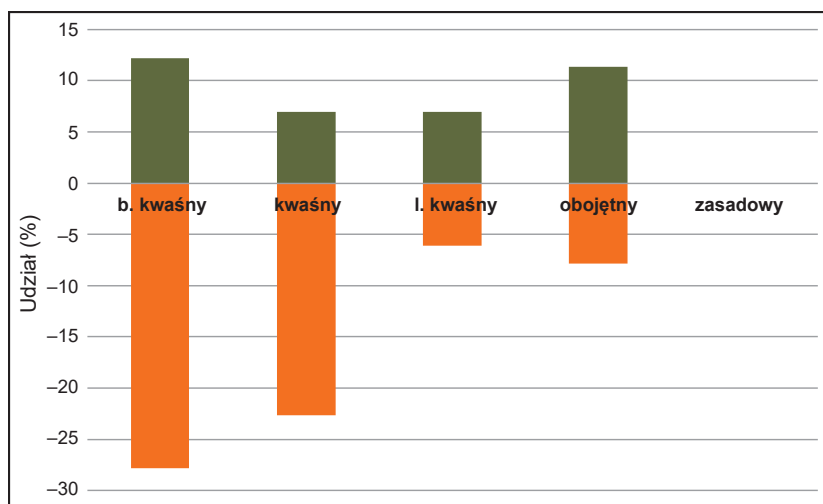
Udział profili wzorcowych w poszczególnych klasach zasobności gleb gruntów ornych w materię organiczną w analizowanych województwach w różnych okresach (%)

Kategorie zasobności		woj. lubelskie		woj. podlaskie		woj. dolnośląskie		woj. wielkopolskie	
		1960–1980	2010–2019	1960–1980	2010–2019	1960–1980	2010–2019	1960–1980	2010–2019
≤ 1	niska	1,7	3,5	14,6	6,9	7,2	0,0	8,1	13,5
1–2	średnia	57,4	80,2	57,2	71,6	32,1	50,0	64,9	75,7
2–3,5	wysoka	38,3	12,1	22,7	18,5	53,6	42,9	24,3	8,1
> 3,5	b. wysoka	2,6	4,3	5,5	3,0	7,1	7,1	2,7	2,7

Źródło: opracowanie własne

Przyrost zawartości materii organicznej stwierdzono w większości przypadków na glebach lekkich, często okresowo zbyt suchych, co należy zapewne tłumaczyć sposobem ich rolniczego użytkowania, stosowanymi płodozmianami, nawożeniem organicznym i innymi elementami agrotechniki sprzyjającymi akumulacji próchnicy. Należy zaznaczyć, że gleby lekkie w większości charakteryzuje opadowy typ gospodarki wodnej, dlatego na kształtowanie gospodarki wodnej tych gleb, a zatem i na warunki akumulacji materii organicznej, nie wpływa podsiąk kapilarny. Wzrost wielkości plonów i resztek poźniwnych w ostatnich kilkudziesięciu latach spowodował wzrost ilości biomasy wchodzącej w cykl przemian próchnicy. Kontrastuje to z kierunkiem zmian zawartości materii organicznej w glebach o początkowo wysokich jej zasobach, w większości zależnych od podsiąku kapilarnego, funkcjonujących w opadowo-gruntowym typie gospodarki wodnej.

Warto wspomnieć, że w glebach o początkowym odczynie obojętnym (pH w 1 M KCl 6,5–7,2) w województwie lubelskim zaobserwowano w znacznej części profili wzorcowych zjawiska akumulacji materii organicznej (rys. 5). Obserwacja ta potwierdza tezę o bardziej stabilnej materii organicznej w glebach niezakwaszonych.



Rys. 5. Udział procentowy profili wzorcowych w województwie lubelskim, w których odnotowano spadek lub wzrost zawartości materii organicznej, w zależności od odczynu gleby (kolor zielony – przyrost zawartości materii organicznej, kolor pomarańczowy – spadek zawartości materii organicznej)

Źródło: opracowanie własne

Wyjaśnienie wpływu rolnictwa na wieloletnie zmiany zawartości materii organicznej

W celu wyjaśnienia wpływu historycznych zmian w rolnictwie na zmiany zawartości materii organicznej w glebach zastosowano modelowanie z wykorzystaniem modelu RothC. Na obszarze testowym, będącym częścią województwa dolnośląskiego, wykorzystano dane wyjściowe z profili wzorcowych oraz ponowne pomiary w tych samych lokalizacjach w okresie 2010–2013. Uzupełnieniem bazy danych o właściwościach fizycznych i chemicznych gleb była baza danych o warunkach siedliskowych w miejscach pobrania próbek, w tym wysokości opadów atmosferycznych, średniej temperatury powietrza, głębokości zalegania wód gruntowych oraz numeryczny model terenu dający informację o ukształtowaniu powierzchni i rzeźbie terenu. Dane te pozwalały określić wpływ czynników naturalnych na zawartość materii organicznej w konkretnych punktach. Źródłem danych o rolnictwie były informacje pozyskane z Głównego Urzędu Statystycznego pochodzące ze spisów rolnych oraz spisów powszechnych. Zebrane dane dotyczyły struktury gospodarstw, pogłowia zwierząt gospodarskich, struktury zasiewów, wysokości plonów oraz nawożenia z okresu 1960–2013 w seriach co 8–10 lat. Kierunek produkcji na badanym obszarze w tym okresie uległ istotnej zmianie z produkcji mieszanej, z dużym udziałem produkcji zwierzęcej, na wysokospecjalistyczną produkcję roślinną (tab. 3).

Tabela 3

Charakterystyka rolnictwa na obszarze testowym woj. dolnośląskiego w latach 1969 i 2010

1969	2010
• Rolnictwo mieszane z elementami produkcji zwierzęcej w niemal każdym gospodarstwie • Pogłowie zwierząt na poziomie ok. 80LU/100 ha UR oraz znaczne dawki obornika • Trwałe użytki zielone – 13% UR • Rośliny pastewne – 14% GO • Bobowate i trawy – 9% GO	• Specjalistyczna produkcja roślinna • Większość gospodarstw bez produkcji zwierzęcej (pogłowie zwierząt 14LU/100 ha UR) i nawożenia obornikiem • Trwałe użytki zielone – 5,6% UR • Rośliny pastewne – 1,8% GO • Bobowate i trawy – 9% GO

Źródło: Kaczyński i in., 2017 (5)

RothC to jeden z najlepiej znanych modeli wykorzystywanych do badania dynamiki węgla w glebach, również w relacji do zmieniających się warunków klimatycznych, siedliskowych i agronomicznych. Model został uruchomiony dla 94 lokalizacji o znanej początkowej zawartości węgla w glebie na badanym obszarze. W modelowaniu oceniono scenariusz rozwoju rolnictwa w regionie odzwierciedlający odnotowane zmiany w rolnictwie, a mianowicie powolne przechodzenie na wyspecjalizowaną i intensywniejszą produkcję wraz z postępującym upraszczaniem płodozmianu i spadkiem pogłowia zwierząt wpływającym na spadek nawożenia obornikiem. Punktem wyjścia dla modelowania była sytuacja w 1960 r. z mieszanym systemem produkcji rolnej (współistniejąca produkcja roślinna i zwierzęca), niską intensywnością i zróżnicowanym płodozmianem (5).

Wyniki modelowania wskazują, że w latach 1960–2013 akumulację węgla obserwowano prawie we wszystkich lokalizacjach obszaru charakteryzującego się jego niską początkową zawartością, natomiast trend ten nie był widoczny w glebach o wysokiej zawartości początkowej węgla. Gleby ubogie w węgiel wykazywały stałą jego akumulację w całym okresie 1971–2013 z wyższą intensywnością akumulacji od początku lat 90. XX w. Z kolei na glebach początkowo zasobnych w węgiel w tym samym okresie stwierdzono jego utratę. Spadek ten był raczej stały w latach 1971–2000, podczas gdy intensyfikacja produkcji roślinnej po 2000 roku zatrzymała tę negatywną tendencję i zrównoważyła bilans węgla w glebie (5).

W przypadku województwa dolnośląskiego prawdopodobną przyczyną obserwowanej akumulacji SOC w wielu lokalizacjach był duży udział resztek roślinnych, zwłaszcza słomy zbóż, rzepaku i kukurydzy uprawianej na ziarno, w bilansie materii organicznej. Po transformacji gospodarczej w Polsce w 1990 roku gospodarstwa prywatne przeszły na produkcję roślinną, stąd duży udział w strukturze zasiewów miały kukurydza i rzepak. W sprzyjających warunkach

glebowo-klimatycznych rośliny te osiągały wysokie plony, pozostawiając na polu znaczne ilości słomy, która przy bardzo małej obsadzie zwierząt była prawie w całości pozostawiana na polu. W tabeli 4 przedstawiono przeciętny dopływ węgla z resztkami roślinnymi oraz obornikiem na 1 hektar gruntów ornych na badanym obszarze testowym, ocenione na podstawie danych o rolnictwie. Wyniki wskazują, że pomimo znacznego ograniczenia nawożenia obornikiem całkowity przychód węgla do gleby zwiększył się w wyniku zdecydowanego wzrostu plonu i ilości pozostawianych resztek poźniwnych (5).

Tabela 4

Zmiany średnich ilości węgla wprowadzanych do gleby z resztkami roślinnymi oraz obornikiem w latach 1960–2010 na obszarze testowym

Rok	Średni plon zbóż	C wnoszony z resztkami roślin	C wnoszony z obornikiem
	Mg·ha ⁻¹		
1960	2,15	0,71	0,34
1969	2,84	0,81	0,44
1979	4,03	0,81	0,55
1989	4,08	0,95	0,36
1996	3,97	1,28	0,19
2002	4,30	1,56	0,12
2010	5,16	1,78	0,07

Źródło: Kaczyński i in., 2017 (5)

Stały monitoring zawartości materii organicznej w glebach użytkowanych rolniczo

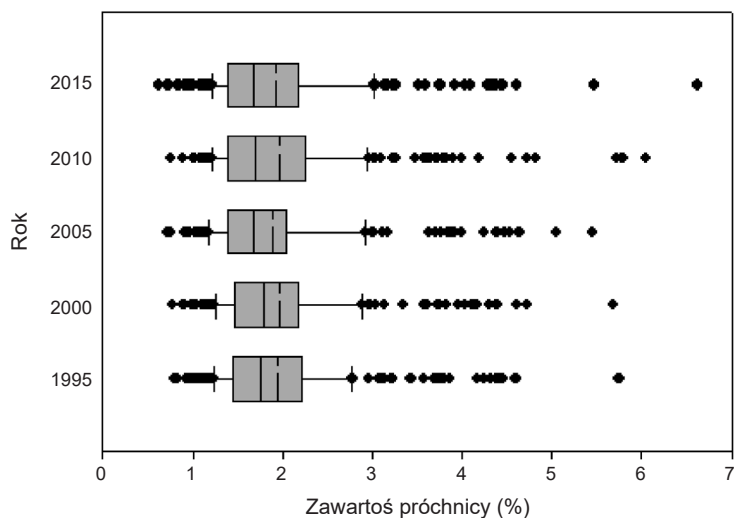
Monitoring chemizmu gleb ornych Polski stanowi podsystem Państwowego Monitoringu Środowiska w zakresie jakości gleb i ziemi. Celem badań jest obserwacja zmian szerokiego zakresu cech gleb użytkowanych rolniczo, szczególnie właściwości chemicznych, zachodzących w określonych przedziałach czasu pod wpływem rolniczej i pozarolniczej działalności człowieka. Monitoring chemizmu gleb użytkowanych rolniczo w Polsce jest realizowany od roku 1995. W 5-letnich odstępach czasowych pobierane i analizowane są próbki glebowe, reprezentujące 216 stałych punktów kontrolnych zlokalizowanych w całym kraju (rys. 6) (10).

W roku 2015 średnia zawartość próchnicy wyniosła 1,94% przy medianie 1,68 %, co oznacza, że nie różniła się istotnie w porównaniu z latami 2010 (odpowiednio: 1,97 i 1,70 %) i 2005 (1,90 i 1,67 %) (rys. 7) (14).



Rys. 6. Rozmieszczenie 216 punktów pomiarowo-kontrolnych w Monitoringu chemizmu gleb ornych Polski

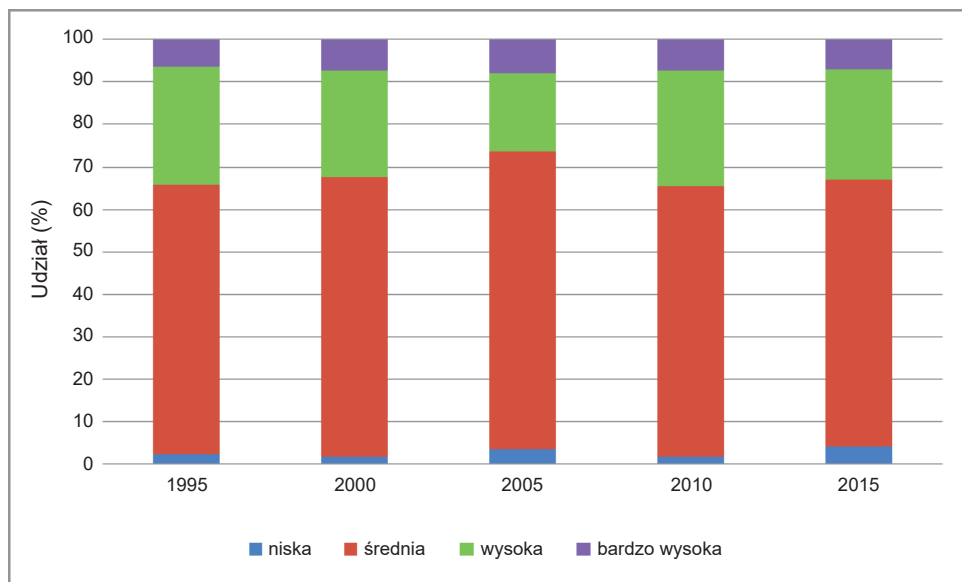
Źródło: Siebielec i in., 2017 (14)



Rys. 7. Rozkład zawartości próchnicy w kolejnych latach Monitoringu chemizmu gleb ornych Polski: linia przerywana – średnia, linia ciągła mediana, prostokąt – dolny i górny kwartyl, linie pionowe na zewnątrz prostokątów – 10 i 90 percentyl, kropki – wartości odstające (poniżej 10 i powyżej 90 percentyla)

Źródło: Siebielec i in., 2017 (14)

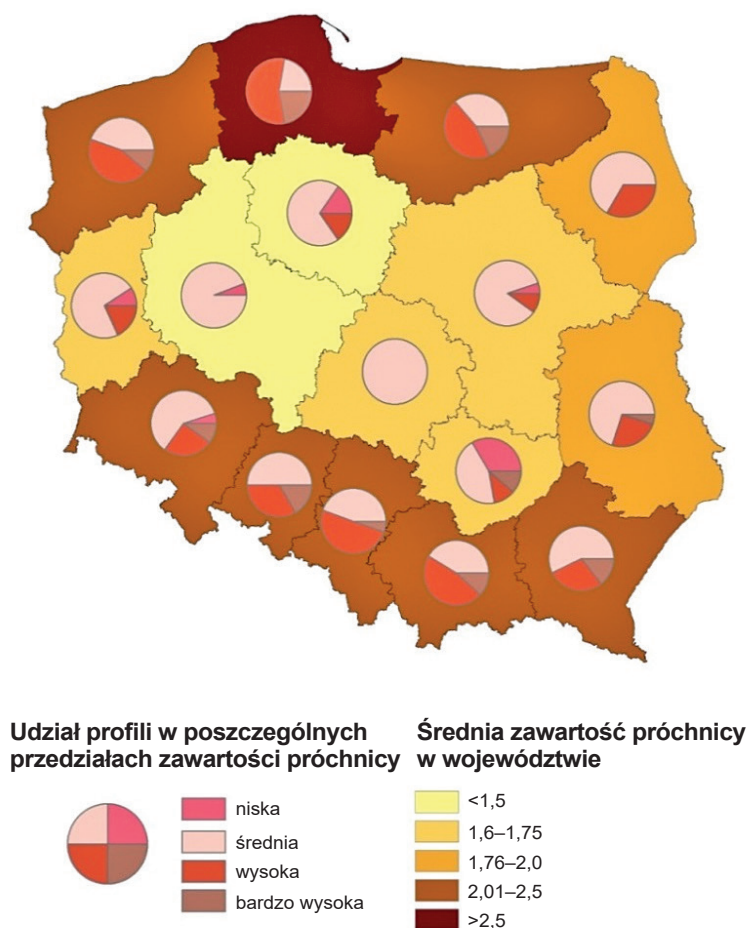
W całej grupie analizowanych punktów przeważały (62,9%) gleby klasyfikowane w przedziale zawartości średniej (1–2%), przy czym udział takich gleb utrzymywał się na względnie stałym poziomie od roku 1995 (rys. 8). Udział profili w poszczególnych klasach zasobności jest względnie stały, co wskazuje na to, że zawartość glebowej materii organicznej jest parametrem zmiennym jedynie w długim okresie czasu.



Rys. 8. Udział profili w klasach zasobności w próchnicę w kolejnych latach Monitoringu chemizmu gleb ornych Polski

Źródło: Siebielec i in., 2017 (14)

Analizując przestrzenną zmienność zawartości próchnicy w województwach, podobnie jak w roku 2010 uwidacznia się strefowość – pasy Polski północnej oraz południowej odznaczają się wyższą średnią zawartością próchnicy, natomiast województwa Polski środkowej – wyraźnie niższą średnią zawartością (rys. 9). Zawartość węgla organicznego jest ściśle skorelowana z zawartością próchnicy, gdyż jego zawartość w próchnicy jest stała i wynosi 58%. Średnia zawartość węgla organicznego w kraju wyniosła 1,12%, a zakres zawartości 0,97–3,84%.



Rys. 9. Przestrzenna zmienność zawartości próchnicy w 2015 roku na podstawie statystyk dla województw wg Monitoringu chemizmu gleb ornych Polski

Źródło: Siebielec i in., 2017 (14)

Badania wieloletnich zmian zawartości materii organicznej w profilach wzorcowych wykonano w ramach projektu NCN „Wyjaśnienie wpływu zmian w rolnictwie na poziom zawartości węgla organicznego w glebie w ujęciu przestrzennym z wykorzystaniem modelu RothC”, nr projektu 2016/21/N/ST10/02649.

Literatura

1. Bień J.: Zagospodarowanie komunalnych osadów ściekowych metodami termicznymi. *Inżynieria i Ochrona Środowiska*, 2012, **15(4)**: 439-449.
2. Czekala W., Pilarski K., Dach J., Janczak D., Szymańska M.: Analiza możliwości zagospodarowania pofermentu z biogazowni. *Technika Rolnicza Ogrodnicza Leśna*, 2012, **4**: 13-15.
3. 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. *Sci. Total Environ.*, 2018, **635**: 995-1003.
4. Jankowski K., Czełuściński W., Jankowska J., Sosnowski J.: Oddziaływanie zróżnicowanych dawek odpadu popieczarkowego na zadarnienie muraw trawnikowych. *Fragm. Agron.*, 2012, **29(3)**: 45-53.
5. Kaczyński R., Siebielec G., Hanegraaf M.C., Korevaar H.: Modelling soil carbon trends for agriculture development scenarios at regional level. *Geoderma*, 2017, **286**: 104-115.
6. Kodeks Dobrej Praktyki Rolniczej. Warszawa 2002, ss. 96.
7. Kucharczak K., Stępień W., Gworek B.: Kompostowanie odpadów komunalnych jako metoda odzysku substancji organicznej. *Ochrona Środowiska i Zasobów Naturalnych*, 2010, **42**: 240-254.
8. Majchrowska-Safaryan A., Tkaczuk C.: Możliwość wykorzystania podłoża do produkcji pieczarki w nawożeniu gleb jako jeden ze sposobów jego utylizacji. *Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering*, 2013, **58(4)**: 57-62.
9. Milosević N.A., Marinković J.B., Tintor B.B.: Mitigating abiotic stress in crop plants by microorganisms. *Proc. Nat. Sci. Matica Serpska Novi Sad*, 2012, **123**: 17-26.
10. Siebielec G.: Stały monitoring gleb użytków rolnych Polski. *Studia i Raporty IUNG-PIB*, 2017, **51(5)**: 57-72.
11. Siebielec G.: Dobre praktyki rolnicze w zarządzaniu strukturą gleby i rodzajem uprawy w celu ograniczenia strat substancji nawozowych. W: *Zrównoważone rolnictwo w służbie bioróżnorodności*. Fundacja na rzecz Rozwoju Polskiego Rolnictwa, Warszawa, 2019, s. 85-90.
12. Siebielec G., Jadczyzsyn T., Klimkowicz-Pawlas A., Mroczkowski W., Niedźwiecki J., Suszek-Łopatka B.: Raport końcowy z tematu badawczego Nr 2.23 pt. Ocena środowiskowych skutków stosowania osadów ściekowych. IUNG-PIB Puławy, 2015, ss. 32.
13. Siebielec G., Siebielec S., Lipski D.: Long-term impact of sewage sludge, digestate and mineral fertilizers on plant yield and soil biological activity. *J. Clean. Prod.*, 2018, **187**: 372-379.
14. Siebielec G., Smreczak B., Klimkowicz-Pawlas A., Kowalik M., Kaczyński R., Koza P., Ukalska-Jaruga A., Łysiak M., Wójtowicz U., Poręba L., Chabros E.: Raport z III etapu realizacji zamówienia „Monitoring Chemizmu Gleb Ornych w Polsce w latach 2015–2017. Główny Inspektorat Ochrony Środowiska, IUNG-PIB, 2017, ss. 194.
15. Siebielec G., Stuczynski T.: Metale śladowe w komunalnych osadach ściekowych wytwarzanych w Polsce. *Proceedings of ECOpole*, 2008, **2**: 479-484.
16. Smith P., Powlson D.S., Glendining M.J., Smith J.U.: Preliminary estimates of the potential for carbon mitigation in European soils through no-till farming. *Glob. Change Biol.*, 1998, **4**: 679-685.
17. Smreczak B., Jadczyzsyn J.: Badania właściwości gleb użytkowanych rolniczo w latach 1992-1997 i ich wykorzystanie w ocenach rolniczej przestrzeni produkcyjnej. *Studia i Raporty IUNG-PIB*, 2017, **51(5)**: 41-56.
18. Terelak H., Motowicka-Terelak T., Wróblewska E., Gawrysiak L., Pietruch C.: Mapa zawartości substancji organicznej w glebach użytków rolniczych Polski. IUNG Puławy, 2001.
19. Zdanowicz T.: Raport o oddziaływaniu planowanego przedsięwzięcia na środowisko. Przedsięwzięcie: Modernizacja Ośrodka Pstrągowego „Kamień-Jutrzenka”, 2001.

Adres do korespondencji:

*dr hab. Grzegorz Siebielec, prof. IUNG-PIB
Zakład Gleboznawstwa Eroзии i Ochrony Gruntów
IUNG-PIB
ul. Czartoryskich 8, 24-100 Puławy
tel. 81 47 86 910
email: gs@iung.pulawy.pl*

AUTOR	ORCID
Grzegorz Siebielec	0000-0001-8089-6123
Artur Łopatka	0000-0002-6977-4464
Bożena Smreczak	0000-0001-8972-8636
Radosław Kaczyński	0000-0002-2427-9099
Sylwia Siebielec	0000-0001-9516-1939
Piotr Koza	0000-0002-0243-7631
Jacek Dach	0000-0002-3162-1198