

UNIWERSYTET TECHNOLOGICZNO-PRZYRODNICZY

im. J.J. ŚNIADECKICH W BYDGOSZCZY

WYDZIAŁ ROLNICTWA I BIOTECHNOLOGII

ROZPRAWA DOKTORSKA

**WPLYW PROCESÓW STABILIZACJI
I HIGIENIZACJI KOMUNALNYCH OSADÓW
ŚCIEKOWYCH STOSOWANYCH W ROLNICTWIE
NA JAKOŚĆ GLEBY**

mgr inż. Tomasz Wojciechowski

PROMOTOR

prof. zw. dr hab. inż. Janusz Hermann

BYDGOSZCZ 2017

Pragnę serdecznie podziękować

Promotorowi

Panu prof. zw. dr hab. inż. Januszowi Hermannowi

*za wiele lat współpracy, opiekę merytoryczną,
za cenne uwagi i sugestie oraz
cierpliwość i zaangażowanie,
dzięki któremu możliwe było napisanie tej pracy.*

SPIS TREŚCI

STRESZCZENIE	7
1. WSTĘP I CEL PRACY	9
2. PRZEGLĄD LITERATURY	11
2.1 ASPEKTY PRAWNE DOTYCZĄCE STOSOWANIA KOMUNALNYCH OSADÓW ŚCIEKOWYCH	13
2.2 PRZETWARZANIE OSADÓW ŚCIEKOWYCH.....	15
2.3 WPLYW OSADÓW ŚCIEKOWYCH NA WŁAŚCIWOŚCI GLEB ORAZ ZAWARTOŚĆ MATERII ORGANICZNEJ.....	19
2.4 WPLYW NAWOŻENIA OSADAMI ŚCIEKOWYMI NA PLONOWANIE ROŚLIN	22
2.5 ROZKŁAD MATERII ORGANICZNEJ POCHODZĄCEJ Z OSADÓW ŚCIEKOWYCH	24
2.6 OGRANICZENIA I POTENCJALNE ZAGROŻENIA W STOSOWANIU OSADÓW ŚCIEKOWYCH	25
2.7 KORZYŚCI WYNIKAJĄCE ZE STOSOWANIA KOMPOSTÓW NA BAZIE KOMUNALNYCH OSADÓW ŚCIEKOWYCH.....	29
3. MATERIAŁ I METODY BADAŃ	31
3.1 MATERIAŁ BADAWCZY	31
3.2 METODY BADAŃ GLEB I OSADÓW ŚCIEKOWYCH	37
4. WYNIKI BADAŃ I Dyskusja	41
4.1 SKŁAD CHEMICZNY, MIKROBIOLOGICZNY I PARAZYTOLOGICZNY OSADÓW ŚCIEKOWYCH STABILIZOWANYCH RÓŻNYMI METODAMI.....	41
4.2 WPLYW NAWOŻENIA OSADAMI ŚCIEKOWYMI STABILIZOWANYMI RÓŻNYMI METODAMI NA JAKOŚĆ GLEBY	48
4.3 ZAWARTOŚĆ WĘGLA ORGANICZNEGO W GLEBIE	62
4.4 ZAWARTOŚĆ AZOTU OGÓŁEM W GLEBIE	66
4.5 ZAWARTOŚĆ FOSFORU W GLEBIE	74
4.6 ODCZYN GLEBY	76
4.7 WPLYW NAWOŻENIA OSADAMI ŚCIEKOWYMI NA ZAWARTOŚĆ METALI CIĘŻKICH W GLEBIE	77
4.8 WPLYW STOSOWANIA OSADÓW ŚCIEKOWYCH NA WIELKOŚĆ PLONU ZIARNA KUKURYDZY	83
4.9 WPLYW STOSOWANIA OSADÓW ŚCIEKOWYCH NA WYSOKOŚĆ ORAZ OBSADĘ ROŚLIN.....	85
4.9.1 Wysokość roślin	85
4.9.2 Obsada roślin	87
5. WNIOSKI	89
6. SPIS LITERATURY.....	90
7. ZAŁĄCZNIKI.....	101

STRESZCZENIE

Celem niniejszej pracy była ocena wpływu metod stabilizacji i higienizacji osadów ściekowych stosowanych rolniczo na jakość gleby i plon uprawianych roślin.

W ramach pracy zrealizowano trzyletnie jednoczynnikowe doświadczenie polowe w trzech powtórzeniach. W ramach doświadczenia oznaczano ogólną zawartość węgla organicznego i azotu, zawartość metali ciężkich i odczyn gleby pod wpływem zastosowanego nawożenia, a także określano wpływ nawożenia osadami ściekowymi stabilizowanymi różnymi metodami na obsadę i wysokość oraz wielkość plonu ziarna kukurydzy.

Założono, że wprowadzane do gleby komunalne i przemysłowe osady ściekowe stabilizowane różnymi metodami stanowią alternatywne źródło materii organicznej oraz składników pokarmowych, wpływając na poprawę jakości gleby oraz plon uprawianych roślin.

Wykazano, że stosowanie osadów ściekowych stabilizowanych różnymi metodami przełożyło się na niewielki wzrost zawartości węgla organicznego i korzystną zmianę odczynu gleby. Wprowadzanie do gleby osadów ściekowych stabilizowanych różnymi metodami nie spowodowało istotnego spadku lub wzrostu zawartości azotu ogółem oraz przekroczenia dopuszczalnych zawartości (stężeń) metali ciężkich w glebie określonych w rozporządzeniu Ministra Środowiska z dnia 9 września 2002 r. w sprawie standardów jakości gleby oraz standardów jakości ziemi [134, obecnie 128].

Stwierdzono, że stosowanie osadów ściekowych stabilizowanych różnymi metodami wpłynęło pozytywnie na wzrost wysokości oraz zwiększenie obsady roślin. Nie zaobserwowano natomiast jednoznacznych zależności pomiędzy wzrostem lub spadkiem plonu ziarna kukurydzy a rodzajem zastosowanego osadu ściekowego.

Uzyskane wyniki pozwalają wnioskować, że stosowanie osadów ściekowych stabilizowanych różnymi metodami wywiera pozytywny wpływ zarówno na jakość gleby, jak i zwiększenie wysokości i obsady roślin (plonu biomasy roślin), w związku z czym może stanowić istotny element prowadzenia zrównoważonej uprawy kukurydzy.

SUMMARY

The aim of this work was to assess the impact that different stabilization methods of sewage sludges used in agriculture have on soil quality and yield of cultivated crops.

In the course of work a three-year single-factor field experiment was conducted with three replications. During the experiment the following parameters were measured: total organic carbon and soil nitrogen content, heavy metal content, as well as changes in soil pH in relation to fertilization. The influence of differently stabilized sewage sludge fertilization on plant population and height and corn grain yield was also determined.

It has been assumed that differently stabilized municipal and industrial sewage sludges incorporated into soil will act as an alternative source of organic matter and nutrients, having a positive effect on soil quality and yield of cultivated crops.

It has been demonstrated that the application of differently stabilized sewage sludges leads to a small increase in organic carbon content and a beneficial change in soil pH. However, it has caused neither a decrease, nor an increase in total nitrogen content and has entailed no exceedance of permissible limit values for heavy metal contents (concentrations) in soils as put forward in the Decree of the Minister for the Environment of 9 September 2002 on soil quality standards and ground quality standard [134, currently 128].

It has been found that the application of differently stabilized sewage sludges has had a positive effect on plant height and population. On the other hand, no definitive correlation between an increase or a decrease in corn grain yield and the type of sewage sludge used has been observed.

Given the results obtained it is possible to conclude that the use of differently stabilized sewage sludges has a positive impact on both soil quality and plant height and population (plant biomass yield), thus it can become an important part of sustainable corn production.

1. WSTĘP I CEL PRACY

Rocznie w Polsce powstaje około pół miliona ton suchej masy osadów ściekowych. Składają się one przede wszystkim z martwej masy mikroorganizmów i stanowią uboczny produkt biologicznego oraz mechaniczno-biologicznego procesu oczyszczania ścieków. Zgodnie z definicją zawartą w ustawie o odpadach [154] komunalne osady ściekowe są to odpady - pochodzące z oczyszczalni ścieków osady z komór fermentacyjnych oraz innych instalacji służących do oczyszczania ścieków komunalnych oraz innych ścieków o składzie zbliżonym do składu ścieków komunalnych. Ze względu na zawartość w osadach ściekowych cennych dla rolnictwa składników pokarmowych (m.in. azotu, fosforu, potasu i wapnia), a także łatwo rozkładanej substancji organicznej [71, 72, 123, 124] przyrodnicze wykorzystanie osadów jako nawozu organicznego powinno być podstawowym kierunkiem ich zagospodarowania [45, 170]. Zgodnie z założeniami idei gospodarki o obiegu zamkniętym, powrót do gleby materii organicznej zawartej w osadach ściekowych jest zamknięciem obiegu materii w przyrodzie. Osady winny trafiać do gleb w sposób bezpieczny czyli stabilne i w dawkach nie powodujących przekroczeń zawartości substancji i pierwiastków niepożądanych.

Literatura przedmiotu [41, 64, 145] wskazuje, że stosowanie osadów ściekowych wpływa korzystnie na fizyczne, chemiczne oraz biologiczne właściwości gleby, poprawiając w ten sposób jej jakość. Przeprowadzone dotychczas badania [29, 39, 58, 88, 93, 95, 99] wykazały, że stosowanie osadów ściekowych powoduje wzrost zawartości materii organicznej i azotu ogółem oraz korzystną zmianę odczynu gleb [35, 37, 44, 52, 60, 156]. Wielu autorów [33, 46, 47, 48, 62, 92, 122, 149] wskazuje także, że stosowanie osadów ściekowych wpływa korzystnie na zwiększenie plonu ziarna i biomasy roślin.

Wprowadzana do gleby materia organiczna zawarta w osadach ściekowych podlega procesom transformacji w wyniku przebiegających równocześnie procesów mineralizacji i humifikacji. Procesy te wpływają na zawartość węgla organicznego, dostępność i wykorzystanie składników pokarmowych oraz pośrednio na plonowanie roślin [35, 45, 84, 151]. Kierunek i nasilenie tych procesów warunkowane są m.in. składem wprowadzanego materiału, który zależy od stopnia stabilizacji osadu ściekowego, a co z tym związane od zastosowanej metody stabilizacji [20, 58].

Założono hipotezę, że wprowadzane do gleby komunalne i przemysłowe osady ściekowe stabilizowane i higienizowane różnymi metodami, stanowią alternatywne źródło materii organicznej oraz składników pokarmowych, wpływając na poprawę jakości gleby oraz plon uprawianych roślin. Założono możliwość sterowania i modelowania składem osadów, tak aby zostały wytworzone produkty o standaryzowanych cechach jakościowych.

Celem niniejszej pracy była ocena wpływu metody stabilizacji i higienizacji osadów ściekowych stosowanych rolniczo na zawartość w glebie węgla organicznego, azotu ogółem, fosforu, potasu i wapnia, a także odczyn gleby oraz zawartość niklu, chromu, ołowiu, cynku, miedzi, rtęci, kadmu, jak również wpływu na plon uprawianych roślin.

2. PRZEGLĄD LITERATURY

Zgodnie z przyjętymi normami prawnymi dotyczącymi gospodarowania odpadami, obecny sposób postępowania z osadami ściekowymi winien prowadzić do ponownego ich wykorzystania i recyklingu [76, 142]. Założenie to jest zgodne z założeniami zawartymi w Komunikacie Komisji do Parlamentu Europejskiego, Rady, Europejskiego Komitetu Ekonomiczno-Społecznego i Komitetu Regionów pt. Ku gospodarce o obiegu zamkniętym „zero odpadów” dla Europy [76] oraz w Komunikacie Komisji do Parlamentu Europejskiego, Rady, Europejskiego Komitetu Ekonomiczno-Społecznego i Komitetu Regionów pt. Zamknięcie obiegu - plan działania UE dotyczący gospodarki o obiegu zamkniętym [75], w których odpady postrzegane są jako ważne elementy środowiska i traktowane jako zasoby. System gospodarki o obiegu zamkniętym jest systemem zakładającym jak najdłuższe zachowanie wartości dodanej odpadów i pozwalającym na ich ponowne, wielokrotne i produktywne wykorzystanie. Zgodnie z „Programem zero odpadów dla Europy” [76] przechodzenie na gospodarkę o bardziej zamkniętym obiegu, konieczne do realizacji inicjatywy na rzecz zasobooszczędności, może przynieść znaczne korzyści gospodarcze.

Zagospodarowanie komunalnych osadów ściekowych stanowi obecnie jeden z najpoważniejszych problemów wymagających skutecznego rozwiązania zarówno w gminnych oczyszczalniach ścieków, jak i w krajowej gospodarce odpadami [54, 136]. Zgodnie z Aktualizacją Krajowego Programu Oczyszczania Ścieków Komunalnych [2], dobre gospodarowanie osadami ściekowymi polega na takim sposobie postępowania, który pozwala na skuteczne rozwiązywanie problemu przetwarzania i zagospodarowania osadów przy równoczesnym osiągnięciu dobrych efektów w procesach oczyszczania ścieków. Podstawowe cele gospodarki komunalnymi osadami ściekowymi w perspektywie do 2022 r. zostały umieszczone w Krajowym Planie Gospodarki Odpadami [150] i obejmują m.in.: ograniczenie składowania osadów ściekowych, zwiększenie ilości komunalnych osadów ściekowych przetwarzanych przed wprowadzeniem do środowiska oraz osadów przekształcanych metodami termicznymi, a także maksymalizację stopnia wykorzystania substancji biogenych zawartych w osadach przy jednoczesnym spełnieniu wszystkich wymogów dotyczących bezpieczeństwa sanitarnego i chemicznego.

Zgodnie z art. 3 ust. 1 pkt. 4 ustawy z dnia 14 grudnia 2012 r. o odpadach [154] komunalne osady ściekowe definiuje się jako „pochodzący z oczyszczalni ścieków osad z komór fermentacyjnych oraz innych instalacji służących do oczyszczania ścieków komunalnych oraz innych ścieków o składzie zbliżonym do składu ścieków komunalnych”.

Osady ściekowe mogą być wykorzystywane zarówno na cele nieprzemysłowe jak i przemysłowe, przy czym wykorzystanie na cele nieprzemysłowe polega głównie na stosowaniu ich do rekultywacji terenów zdegradowanych oraz do celów rolniczych [124]. Szwedziak [147] podaje,

że najbardziej naturalnym kierunkiem zagospodarowania istniejących i wytwarzanych osadów ściekowych oraz produktów odpadowych jest ich przyrodnicze wykorzystanie.

Komunalne osady ściekowe zawierają cenne dla rolnictwa składniki pokarmowe i substancje organiczne [71, 72]. Przyjmuje się, że wykorzystanie komunalnych osadów ściekowych jako nawozu organicznego jest dobrym sposobem ich zagospodarowania zarówno pod względem obiegu pierwiastków w ekosystemach rolniczych jak i pozytywnego wpływu na bilans materii organicznej w glebie [45, 170]. Według Sadeckiej i Myszograj [136] przyrodnicze wykorzystanie komunalnych osadów ściekowych jest najprostszą i najtańszą metodą ich zdeponowania w środowisku. Osady ściekowe powinny być traktowane jako pełnowartościowy nawóz organiczny, który jest bogaty w azot, fosfor i mikroelementy oraz łatwo rozkładalną substancję organiczną, z której w procesie mineralizacji uwolnione zostają składniki odżywcze [123, 124]. Kalembasa [68] uważa, że ze względu na dużą zawartość makroskładników, zbliżoną lub wyższą niż w oborniku, osady ściekowe wykazują silne działanie plonotwórcze.

Obecnie w Polsce obserwuje się stały wzrost ilości wytwarzanych komunalnych osadów ściekowych. Zgodnie z danymi Głównego Urzędu Statystycznego w Polsce w 2014 r. wytworzono 556,0 tysięcy Mg s.m. osadów pochodzących z oczyszczalni komunalnych oraz 411,4 tysiąca Mg s.m. z oczyszczalni przemysłowych czyli łącznie 967,4 tys. Mg s.m.. Zgodnie z danymi zawartymi w Roczniku Statystycznym [121] 128,2 tys. Mg zostało wykorzystanych w rolnictwie, 117,0 tys. Mg do rekultywacji gleb, 164,4 tys. Mg przekształconych termicznie, a 135,2 tys. Mg suchej masy poddane składowaniu [121].

Analiza zmian zagospodarowania osadów ściekowych w Polsce od 2005 roku wskazuje na zmniejszenie ilości składowanych osadów ściekowych na składowiskach i stosowanych do rekultywacji. W 2005 roku 35,5% osadów było składowanych, a 28,9% wykorzystywanych w rekultywacji. Obecnie ilość osadów składowanych stanowi ok. 14% całkowitej ich ilości, natomiast wykorzystywanych do rekultywacji ok. 12%. W 2005 roku na cele rolnicze przeznaczano 8,7% całkowitej ilości osadów, natomiast w 2014 roku ok. 13,3% [54, 121].

Mimo wzrostu ilości osadów ściekowych wykorzystywanych na cele rolnicze w ostatnich latach zauważalne są niewielkie tendencje spadkowe tego sposobu ich wykorzystania. W 2010 roku na cele rolnicze zostało wykorzystanych 136,9 tys. Mg s.m. osadów (ok. 15,3% z ogólnej ilości), a w 2014 roku 128,2 tys. Mg, co stanowi ok. 13,3% ogólnej ilości wytworzonych osadów. Trend ten związany jest zarówno ze zmianą wymogów stawianych rolnikom i wynika z ich uszczegółowienia w zakresie stosowania zasad dobrej praktyki rolniczej pod względem zawartości azotu i fosforu w odniesieniu do zapotrzebowania pokarmowego roślin, a także z ograniczeń w terminie ich stosowania [54].

2.1 ASPEKTY PRAWNE DOTYCZĄCE STOSOWANIA KOMUNALNYCH OSADÓW ŚCIEKOWYCH

Podstawowymi aktami prawnymi związanymi z gospodarowaniem osadami ściekowymi są: ustawa z dnia 14 grudnia 2012 r. o odpadach [154], rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 6 lutego 2015 r. w sprawie komunalnych osadów ściekowych [132, dawniej 127] oraz rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 16 lipca 2015 r. w sprawie dopuszczania odpadów do składowania na składowiskach [125]. Przepisy te wynikają z transpozycji do prawa krajowego aktów prawnych Unii Europejskiej, tj. Dyrektywy Rady 86/278/EWG z dnia 12 czerwca 1986 r. w sprawie ochrony środowiska, w szczególności gleby w przypadku wykorzystywania osadów ściekowych w rolnictwie [32], Dyrektywy Parlamentu Europejskiego i Rady 2008/98/WE z dnia 19 listopada 2008 r. w sprawie odpadów oraz uchylająca niektóre dyrektywy [30], a także Dyrektywy Rady 1999/31/WE z dnia 26 kwietnia 1999 r. w sprawie składowania odpadów [31]. Wśród aktów prawnych związanych z gospodarowaniem osadami ściekowymi znajdują się także: rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 20 stycznia 2015 r. w sprawie procesu odzysku R10 [130], rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 15 maja 2015 roku w sprawie odzysku odpadów poza instalacjami i urządzeniami [129] oraz ustawa z dnia 10 lipca 2007 roku o nawozach i nawożeniu [152].

Ustawa o odpadach [154] definiuje pojęcie komunalnych osadów ściekowych, a także obowiązki jakie musi spełnić ich posiadacz. Zapisy ustawy o odpadach określają obowiązki wytwórcy komunalnych osadów ściekowych w zakresie obróbki przed ich stosowaniem, przeprowadzania badań osadów oraz gruntów, na których mają być one stosowane. Komunalne osady ściekowe mogą zostać poddane procesom odzysku lub unieszkodliwione. Procesy odzysku i unieszkodliwiania wykazano odpowiednio w załączniku 1 i 2 ustawy o odpadach [154]. Procesy odzysku obejmują m.in. proces R1, R3 – recykling lub regeneracja substancji organicznych, które nie są stosowane jako rozpuszczalniki (włączając kompostowanie lub inne biologiczne procesy przekształcenia) oraz R10 - obróbka na powierzchni ziemi przynosząca korzyści dla rolnictwa lub poprawę stanu środowiska. Natomiast unieszkodliwianie obejmuje procesy D2, D4, D8, D9, D10 i D13. Cele w jakich komunalne osady ściekowe mogą być stosowane w ramach odzysku na powierzchni ziemi zostały wymienione w art. 96 ww. ustawy [154].

Szczegółowe wymogi dotyczące stosowania komunalnych osadów ściekowych regulują zapisy rozporządzenia Ministra Środowiska w sprawie komunalnych osadów ściekowych [132]. Rozporządzenie to określa wymagania jakie muszą być spełnione podczas stosowania komunalnych osadów ściekowych na cele określone w art. 96 ust. 1 ustawy o odpadach [154]. Zwłaszcza w aspekcie bezpieczeństwa sanitarnego, chemicznego i środowiskowego, a także częstotliwość i metody referencyjne badań komunalnych osadów ściekowych i gruntów na których osady mają być stosowane [160]. Zgodnie z art. 3.2

rozporządzenia dopuszczalna dawka komunalnych osadów ściekowych zależy od rodzaju gruntu, sposobu jego użytkowania, jakości komunalnych osadów ściekowych i gleby oraz zapotrzebowania roślin na fosfor i azot oraz częstotliwość stosowania osadów.

Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 15 maja 2015 roku w sprawie odzysku odpadów poza instalacjami i urządzeniami [129] odnosi się do odpadów o kodzie 19 08 05 – ustabilizowane osady ściekowe, które mogą być poddane procesowi odzysku R3 (kompostowanie). Zgodnie z tym rozporządzeniem w odniesieniu do ustabilizowanych osadów ściekowych (19 08 05) stosuje się art. 96 ustawy o odpadach [154].

Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 20 stycznia 2015 r. w sprawie procesu odzysku R10 [130] odnosi się do odpadów o kodzie 19 08 05 – ustabilizowane komunalne osady ściekowe oraz osadów z zakładowych oczyszczalni ścieków (o kodach: 02 02 04; 02 03 05; 02 04 03; 02 05 02; 02 06 03; 02 07 05). Zgodnie z tym rozporządzeniem ustabilizowane komunalne osady ściekowe (19 08 05) stosuje się przy spełnieniu określonych warunków. Po pierwsze jeśli spełnione są wymagania jak dla komunalnych osadów ściekowych, określone w przepisach ustawy z dnia 14 grudnia 2012 r. o odpadach [154] i w przepisach wydanych na podstawie art. 96 ust. 13 tej ustawy. Po drugie jeśli odpady te są stosowane w taki sposób i w takiej ilości, aby ich stosowanie nie spowodowało pogorszenia jakości gleby, ziemi oraz wód powierzchniowych i podziemnych nawet przy długotrwałym stosowaniu, w szczególności nie spowodowało szkody w środowisku w rozumieniu przepisów ustawy z dnia 13 kwietnia 2007 r. o zapobieganiu szkodom w środowisku i ich naprawie [153]. Stosowanie osadów z zakładowych oczyszczalni ścieków związane jest natomiast ze spełnieniem wymagań określonych w przepisach ustawy z dnia 14 grudnia 2012 r. o odpadach [154] i w przepisach wydanych na podstawie art. 96 ust. 13 tej ustawy. W przypadku odpadów o kodach 02 02 04, 02 03 05, 02 04 03 – spełnione muszą być wymagania określone w przepisach rozporządzenia Parlamentu Europejskiego i Rady (WE) nr 1069/2009 z dnia 21 października 2009 r. określającego przepisy sanitarne dotyczące produktów ubocznych pochodzenia zwierzęcego, nieprzeznaczonych do spożycia przez ludzi i uchylającego rozporządzenie (WE) nr 1774/2002 (rozporządzenie o produktach ubocznych pochodzenia zwierzęcego) [135].

Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 16 lipca 2015 r. w sprawie dopuszczenia odpadów do składowania na składowiskach [125] ma zastosowanie w przypadku przetwarzania komunalnych osadów ściekowych poprzez składowanie. Rozporządzenie to określa kryteria dopuszczenia osadów ściekowych do składowania na składowisku odpadów innych niż niebezpieczne i obojętne. Zgodnie z tym rozporządzeniem dopuszczalne graniczne wartości ogólnego węgla organicznego (TOC) wynoszą 5% suchej masy, straty przy prażeniu (LOI) – 8% suchej masy, a ciepła spalania – 6 MJ/kg suchej masy, co praktycznie wyklucza tę metodę unieszkodliwiania.

Stosowanie nawozów, w tym wyprodukowanych z osadów ściekowych, reguluje ustawa z dnia 10 lipca 2007 roku o nawozach i nawożeniu [152] oraz odpowiednie przepisy wykonawcze. W ustawie tej wyróżnione zostały następujące rodzaje nawozów oraz środków wspomagających uprawę roślin: nawozy mineralne, nawozy naturalne, nawozy organiczne, nawozy organiczno-mineralne, środki poprawiające właściwości gleby oraz środki wspomagające uprawę roślin. Zgodnie z tą ustawą komposty na bazie osadów ściekowych klasyfikowane mogą być dwojako, jako nawóz organiczny (nawóz wyprodukowany z substancji organicznej lub mieszaniny substancji organicznej, w tym komposty, a także komposty wyprodukowane z wykorzystaniem dżdżownic) lub organiczny środek poprawiający właściwości gleby.

Zgodnie z art. 4 ustawy o nawozach i nawożeniu [152] nawozy oraz środki wspomagające uprawę roślin wprowadza się do obrotu na podstawie zezwolenia Ministra właściwego do spraw rolnictwa RP lub zezwolenia uzyskanego w innym kraju, jeśli nawóz spełnia polskie kryteria odnośnie jakości i zawartości zanieczyszczeń [54].

Szczegółowe wymogi dotyczące wprowadzania nawozów organicznych, organiczno-mineralnych i nieorganicznych reguluje natomiast rozporządzenie Ministra Rolnictwa i Rozwoju Wsi z dnia 18 czerwca 2008 r. w sprawie wykonania niektórych przepisów ustawy o nawozach i nawożeniu [126]. Rozporządzenie to określa m.in. dopuszczalne rodzaje zanieczyszczeń występujących w nawozach oraz ich wartości, minimalne wymagania jakościowe jakie powinny spełniać nawozy, a także szczegółowy zakres dokumentacji dotyczącej nawozów i szczegółowy zakres ich badań.

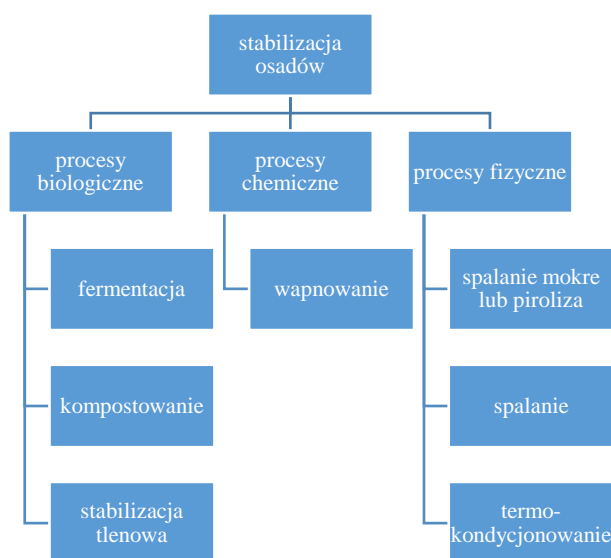
2.2 PRZETWARZANIE OSADÓW ŚCIEKOWYCH

Komunalne osady ściekowe charakteryzują się dużą zmiennością składu chemicznego, która zależy od właściwości ścieków oraz technologii ich oczyszczania i przeróbki. Charakterystyczną cechą osadów ściekowych jest ich stosunkowo wysokie uwodnienie, od 99% w przypadku osadów surowych do 85-55% w osadach odwodnionych. Wartości poniżej 10% wilgotności notuje się tylko w osadach wysuszonych termicznie [13]. Osady ściekowe charakteryzują się niejednorodnym składem chemicznym, zróżnicowaną zawartością aldehydów, ketonów, kwasów organicznych, węglowodorów i stężeniem metali ciężkich oraz zanieczyszczeniem mikrobiologicznym [70].

Istotnym problemem związanym z przyrodniczym wykorzystaniem komunalnych osadów ściekowych jest stosunkowo wysoka zawartość metali ciężkich (najbardziej niepożądane to: kadm, chrom, nikiel, ołów, rtęć) i szkodliwych związków organicznych [71, 124] oraz obecność organizmów patogennych – bakterii chorobotwórczych z rodzaju *Enterobacteriaceae* (np. *Salmonella*, *Shigella*), grzybów (zwłaszcza dermatofitów), wirusów i jaj pasożytów przewodu pokarmowego ludzi i zwierząt [104]. Przyrodnicze wykorzystanie osadów ściekowych wiąże się więc z zastosowaniem metod

powodujących zmiany w ich składzie chemicznym, poprawę stanu sanitarnego, a także właściwości fizycznych [77].

Do podstawowych procesów stosowanych podczas przeróbki osadów ściekowych zalicza się zagęszczanie, stabilizację, odwadnianie oraz suszenie i spalanie [13]. Stabilizacja osadów ściekowych może być prowadzona zarówno na drodze procesów biologicznych, chemicznych jak i termicznych, przyczyniając się do zmiany składu biologiczno-chemicznego osadów. Zwiększenie efektywności stabilizacji osadów ściekowych odbywa się poprzez stosowanie metod zwiększających podatność osadów na biodegradację. Procesy te związane są z osłabieniem błon cytoplazmatycznych mikroorganizmów i uwolnieniem enzymów biorących udział w procesach biochemicznego rozkładu materii organicznej, w konsekwencji przyspieszając proces hydrolizy i zwiększając efektywność procesu stabilizacji [13]. Priorytetowym celem przeróbki osadów ściekowych jest zmniejszenie ich objętości, stabilizacja poprzez obniżenie w nich zawartości związków organicznych oraz higienizacja [13]. Procesy stabilizacji osadów zmieniają niebezpieczne własności składników osadów przekształcając osady niebezpieczne w inne niż niebezpieczne [133]. Schemat procesów stabilizacji osadów ściekowych przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Schemat procesów stabilizacji osadów ściekowych [13]

Stabilizacja chemiczna osadów ściekowych często połączona jest z ich higienizacją. Proces ten polega na zastosowaniu silnie alkalizujących, rzadziej zakwaszających substancji, które skutecznie niszczą mikroorganizmy chorobotwórcze i pasożyty oraz ich formy przetrwalnikowe [26], a także powodują zmiany właściwości osadów [168]. Wysokie lub niskie pH wpływa na zmiany w jonizacji poszczególnych składników białka, zwłaszcza w grupach

anionowych i karboksylowych powodując zmiany w strukturze białek oraz zanik aktywności enzymów. Dość często stosowanym środkiem jest tlenek wapnia, który powoduje powstanie mieszaniny zawierającej więcej suchej masy niż sam osad. Po dodaniu tlenku wapnia (CaO) do osadów następuje proces alkalizacji, a w następstwie emisja amoniaku i obniżenie zawartości azotu [69]. Tlenek wapnia może być stosowany zarówno do osadów surowych jak i ustabilizowanych, jednak ze względów ekologicznych zaleca się stabilizowanie i higienizowanie osadów odwodnionych [86]. Mieszanina powstała po dodaniu CaO ma korzystne właściwości fizyczne z punktu widzenia transportu, przechowywania i rozprowadzania na powierzchni pola. Jednak z powodu dużej zawartości wapnia można ją stosować wyłącznie na glebach wymagających wapnowania [69].

Proces stabilizacji tlenowej oparty jest na tlenowym rozkładzie masy organicznej w warunkach tzw. respiracji endogennej. Proces ten prowadzony jest w otwartych lub zamkniętych komorach z wykorzystaniem powietrza lub równoległe z oczyszczaniem ścieków w komorach osadu czynnego w układzie z przedłużonym napowietrzaniem. Dostarczony z powietrzem tlen jest wykorzystywany przez mikroorganizmy do utleniania związków organicznych, zapobiegając w ten sposób zagniwaniu osadu [11]. Zaletą procesu stabilizacji tlenowej jest przede wszystkim uzyskanie stabilnego biologicznie osadu, zmniejszenie ilości bakterii fermentacyjnych i gnilnych, wstępna higienizacja, zmniejszenie ilości związków organicznych i suchej masy, a także wzbogacenie osadu w substancje humusowe [11,119].

Powszechnie stosowaną metodą stabilizacji osadów ściekowych jest stabilizacja beztlenowa. W porównaniu do tlenowej, proces beztlenowy powoduje powstawanie mniejszych ilości osadu. Rozkład zanieczyszczeń organicznych osadu w warunkach beztlenowych nosi nazwę fermentacji beztlenowej i jest definiowany jako zespół procesów biochemicznych podczas których związki pochodzenia naturalnego (tj. węglowodany, białka oraz tłuszcze) zostają rozłożone do metanu i ditlenku węgla. Podczas takiej fermentacji uzyskuje się biogaz, który jest mieszaniną metanu (55-75%) i ditlenku węgla oraz cennym nośnikiem energii [164].

Biologiczną metodą stabilizacji i jednocześnie odzysku osadów ściekowych jest kompostowanie, definiowane jako termiczny proces biochemiczny, który powoduje mineralizację materii organicznej, a następnie jej humifikację prowadzącą do wytworzenia nawozu. Kompostowanie prowadzi do zmniejszenia masy i objętości osadu oraz do unieszkodliwienia mikroorganizmów patogennych. Do kompostowania mogą być kierowane osady surowe, przefermentowane, mieszane, a także odwodnione o różnym stopniu stabilizacji. Wśród metod kompostowania osadów ściekowych można wyróżnić: naturalne kompostowanie w przyzmacz z przerzucaniem, statyczne kompostowanie w przyzmacz, częściowo zamknięte systemy basenowe, stabilizację alkaliczną i kompostowanie w przyzmacz oraz kompostowanie w zamkniętych komorach [86].

Kolejną grupą metod przetwarzania osadów ściekowych są metody termiczne, które obejmują spalanie, współspalanie oraz procesy alternatywne takie jak mokre utlenianie, piroliza, zgazowanie oraz wityfikacja [12, 148].

Spalanie polega na utlenianiu związków organicznych do ditlenku węgla oraz wody i stosowane jest zazwyczaj w przypadku braku możliwości wykorzystania osadów na cele rolnicze z powodu zbyt wysokich stężeń metali ciężkich [34]. Jeżeli wartość opałowa związków organicznych osadów ściekowych jest zbyt niska do odparowania zawartej w nich wody, wtedy stosuje się współspalanie, czyli przetwarzanie z dodatkowym paliwem [159]. Wśród popularnych metod współspalania wyróżnia się: współspalanie osadów ściekowych na złożu fluidalnym, współspalanie osadów ściekowych w piecach cementowych, współspalanie osadów ściekowych z węglem kamiennym, a także współspalanie osadów ściekowych z węglem brunatnym, drewnem i odpadami komunalnymi [148, 159].

Mokre utlenianie charakteryzuje się możliwością wykorzystania osadu zagęszczonego mechanicznie (nieodwodnionego). Podczas przebiegu procesu mokrego utleniania w reaktorze panują warunki wysokiego ciśnienia i temperatury, które umożliwiają oksydację masy organicznej zawartej w osadach. Efektem tego procesu jest uzyskanie zmineralizowanego osadu, odcieku biodegradowalnego i gazu poreakcyjnego [25].

Piroliza prowadzona jest w środowisku beztlenowym w temperaturze 300-500°C. Produktami tego procesu są: faza stała, gaz pirolityczny oraz faza ciekła, czyli mieszanina olejów i smół [43]. Kolejna metoda - zgazowanie polega na termochemicznej przemianie stałej lub ciekłej substancji organicznej w gaz. Skład gazu zależy głównie od substancji, która jest poddawana temu procesowi. Wśród produktów procesu zgazowania wyróżnia się m.in. CO₂, CO, H₂O, CH₄, H₂ oraz śladowe ilości wyższych węglowodorów, gazy inertne i zanieczyszczenia. Proces zgazowania zachodzi w warunkach niedomiaru tlenu oraz w obecności czynnika zgazowującego [14]. Wityfikacja natomiast obejmuje termiczną przemianę substancji w postać szklaną. Proces ten polega na kontrolowanym dawkowaniu energii do substancji, która w wysokiej temperaturze ulega rozkładowi wytwarzając fazę gazową, a następnie ulega spopieleniu oraz stopieniu. Produkt tego procesu – wityfikat – charakteryzuje się amorficzną strukturą, małą reaktywnością chemiczną, stosunkowo wysoką odpornością mechaniczną oraz brakiem toksyczności [15].

Ostatnią z analizowanych metod stabilizacji osadów ściekowych jest ich suszenie, jednak nie jest to metoda ostatecznego ich zagospodarowania. Proces suszenia prowadzi do zmian postaci fizycznej osadów, ograniczając znacząco ich masę i objętość [12]. Suszenie, podobnie do innych procesów usuwania wody z odpadów, wykorzystuje zjawiska fizyczne oddzielania fazy stałej od ciekłej. Suszenie termiczne osadów prowadzone jest w odpowiednich suszarkach w podwyższonej temperaturze. Temperatura suszenia nie powinna jednak przekraczać 85°C, ponieważ powyżej tej temperatury rozpoczyna się zwęglanie materii organicznej, obniżając w ten sposób właściwości

nawozowe oraz powodując wzrost emisji odorów, a także ilości trudno- rozkładalnych biologicznie związków organicznych [53]. Do suszenia odpadów metodą termiczną wykorzystuje się głównie biogaz, parę, gaz ziemny, olej opałowy oraz ciepło odpadowe (nadwyżki pary z zakładów przemysłowych lub ciepło z turbin gazowych) [87]. Zaletą termicznego suszenia osadów jest otrzymanie osadu o wysokiej zawartości suchej masy (nawet 90%) oraz stosunkowo krótki czas suszenia. Dodatkowym atutem tego procesu jest higienizacja osadów pod wpływem wysokiej temperatury. Wysokotemperaturowy proces suszenia osadów jest kosztowny i skomplikowany, dlatego stosowany jest głównie w dużych oczyszczalniach ścieków. Technologicznie prostszym procesem suszenia osadów ściekowych jest suszenie słoneczne. W procesie tym wykorzystuje się efekt cieplarniany, który powstaje w suszarni w wyniku przenikania do jej wnętrza promieniowania słonecznego [12].

Podstawą oceny stopnia stabilizacji osadów ściekowych jest zazwyczaj określenie podatności materii organicznej na mineralizację, a stopień rozkładu substancji organicznej jest uznawany za kryterium prawidłowo przeprowadzonego procesu. Ubytek materii organicznej podczas przetwarzania osadów zależy od składu przetwarzanej masy, a także warunków prowadzenia procesu [21]. Jak podają Kulikowska i Bilicka [80] podczas kompostowania osadów ściekowych następuje bardzo wyraźny ubytek materii organicznej związany z intensywną mineralizacją. Z badań przeprowadzonych przez Bohdziewicz i Kuglarza [18] wynika, że wyższym ubytkiem suchej masy materii organicznej charakteryzują się mieszanki kofermentacyjne (od 46,64% do 62,73) niż próbki zawierające tylko osad ściekowy. Wysokiński i Kalembasa [168] wskazują natomiast, że alkalizowanie osadu wapnem lub popiołem powoduje istotny spadek zawartości węgla organicznego (odpowiednio o 34,0 i 33,1%) w porównaniu do osadu surowego.

Testy służące do oceny stopnia stabilizacji prowadzone są w warunkach tlenowych i beztlenowych [21]. Ocenę stopnia stabilizacji tlenowej określa się na podstawie testów respiracji, w tym także wskaźnika AT-4, który wyraża ilość tlenu pobranego przez próbkę materiału w ciągu czterech kolejnych dni [138]. Natomiast testy prowadzone w warunkach beztlenowych oparte są na pomiarze wydzielanego CO₂ i CH₄ z odpadów znajdujących się w komorach gnilnych, zalicza się do nich m.in.: test fermentacyjny GB21, test inkubacyjny GS90 oraz BM100 [21].

2.3 WPLYW OSADÓW ŚCIEKOWYCH NA WŁAŚCIWOŚCI GLEB ORAZ ZAWARTOŚĆ MATERII ORGANICZNEJ

Osady ściekowe oraz produkty ich mikrobiologicznych przemian wpływają korzystnie na fizyczne, chemiczne oraz biologiczne właściwości gleb [145]. Mikro i makroskładniki zawarte w osadach ściekowych są stosunkowo łatwo przyswajalne dla roślin, a zgromadzona w nich materia organiczna poprawia

bilans związków próchnicznych [64]. Wprowadzanie osadów ściekowych do gleby wpływa korzystnie na zwiększenie zasobów materii organicznej, poprawę struktury gleby poprzez zwiększenie stopnia infiltracji, stabilność agregatów oraz pojemność wodną [41].

Diez [29] na podstawie przeprowadzonych badań polowych stwierdził, że nawożenie osadami ściekowymi w dawce $24,5 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ w ciągu sześciu lat spowodowało wzrost zawartości materii organicznej o 0,34% ($8,6 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$) na glebie żwirowej oraz o 0,43% ($12,9 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$) na glebie lessowej. Morel i Guckert [93] w badaniach polowych stwierdzili, że stosowanie osadów ściekowych stabilizowanych wapnem, w porównaniu do miejsc kontrolnych, spowodowało wzrost zawartości materii organicznej o 39% (przy dawce $70 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$) oraz o 96% (przy dawce $140 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$). Ponadto zaobserwowali, że po trzech latach stosowania osadów ściekowych nastąpił spadek zawartości materii organicznej, niemniej zawartość ta była nadal wyższa niż w miejscach kontrolnych (odpowiednio o 9 i 33%). Górska i Stępień [52] w przeprowadzonym doświadczeniu wazonowym odnotowali wzrost zawartości węgla organicznego i azotu ogółem (średnio o 7,14 i 15,6%) po zastosowaniu nawożenia przekompostowanym osadem ściekowym wymieszonym z popiołem. Podobnie Marando i in. [88] po trzynastu miesiącach trwania doświadczenia, w którym stosowano osady ściekowe w dawce $107 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ osadów suszonych termicznie i $171 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ osadów poddanych kompostowaniu zaobserwowali wzrost zawartości materii organicznej i azotu odpowiednio: z 0,5 do 1,9% i 0,07 do 1,4% (osady suszone) oraz z 0,5 do 1,7% i 0,07 do 0,11% (osady kompostowane). Wzrost zawartości materii organicznej jako efekt stosowania osadów ściekowych zaobserwowali także Obbard [99], Nagar i in. [95] oraz Fytilli i Zabaniotou [39].

Siebec i Stuczyński [140] uważają, że stosowanie osadów ściekowych może spowodować wzrost zawartości fosforu ogólnego w glebie o 50-95%. Natomiast z badań przeprowadzonych przez Wołejko i Wydro [162] wynika, że nawożenie osadem ściekowym spowodowało wzrost zawartości fosforu w glebie o 100% w odniesieniu do poletek kontrolnych. Jak podają Mazur i Mokra [89] wprowadzony do gleby wraz z osadem ściekowym fosfor gromadzi się przede wszystkim w wierzchniej warstwie gleby i odgrywa istotną rolę w zaopatrzeniu roślin w następnych latach.

Filipiak i in. [37] na podstawie przeprowadzonego doświadczenia polowego stwierdzili, że stosowanie osadu ściekowego poddanego stabilizacji tlenowej wpłynęło na poprawę zasobności gleby w fosfor – z przedziału charakteryzującego się oceną średnią (od 10,1 do $15,0 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) do grupy o bardzo wysokiej ocenie zasobności ($>20 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$). Moreno-Penaranda i in. [94] po 5,5 latach od wymieszania osadu ściekowego z gruntem powapiennym w proporcji 5:1 odnotowali wzrost zawartości fosforu ogólnego od 79,1 do 94,1%. Natomiast Vaca i in. [156] stwierdzili, że stosowanie osadu ściekowego oraz kompostu na bazie osadu ściekowego przyczyniło się do istotnego wzrostu zawartości fosforu o 35,4 i 42,4 pkt. % w odniesieniu

do poletek nienawożonych oraz o 37,4 i 44,4 pkt. % w porównaniu do poletek, gdzie stosowano wyłącznie nawożenie mineralne.

Badania Filipiaka i in. [37] wykazały, że stosowanie osadów ściekowych wpływa nie tylko na wzrost zawartości materii organicznej i składników odżywczych, ale również na odczyn gleb, wzrost stabilności agregatów glebowych oraz zwiększenie pojemności wymiennej kationów. Merrington i in. [90] podają, że wzrost pojemności wymiennej oznacza silniejsze wiązanie kationów w środowisku glebowym, a tym samym immobilizację substancji odżywczych i większą odporność na zanieczyszczenie. Ociepa i in. [102] na podstawie przeprowadzonego doświadczenia wazonowego stwierdzili, że stosowanie osadów ściekowych pochodzących z różnych źródeł wpłynęło na poprawę właściwości sorpcyjnych gleb. Obiekty na których stosowano nawożenie osadami ściekowymi lub ich mieszkankami charakteryzowały się wyższą pojemnością sorpcyjną (w przedziale od 23,8% do 53,5%) i wyższą sumą zasadowych kationów wymiennych (w przedziale od 51,7 do 113,7%) niż w obiekcie kontrolnym. Również Fijałkowski i Kacprzak [35] na podstawie przeprowadzonego doświadczenia wazonowego stwierdzili, że stosowanie osadów ściekowych spowodowało wzrost zdolności buforowych gleb wyrażonych jako suma kationów o charakterze zasadowym oraz całkowitej pojemności sorpcyjnej. Obiekty na których stosowano osady ściekowe w proporcji wagowej 50% udziału osadu charakteryzowały się ok. 5-krotnie wyższą sumą kationów o charakterze zasadowym oraz 2,5-krotnie wyższą całkowitą pojemnością sorpcyjną.

Górska i Stępień [52] oraz Iżewska [60] podają, że stosowanie osadów ściekowych wpływa na zmianę odczynu gleb. Filipek [36] na podstawie przeprowadzonego doświadczenia polowego stwierdził, że stosowanie osadów pochodzących z oczyszczalni ścieków z mleczarni spowodowało obniżenie wartości pH w glebie (średnio o 0,35). Natomiast Filipiak i in. [37] zaobserwowali, że pod wpływem stosowania ustabilizowanego tlenowo i odwodnionego osadu z oczyszczalni ścieków komunalnych w ciągu czterech lat prowadzenia doświadczenia odczyn gleb zmienił się z kwaśnego (pH=4,7) i lekko kwaśnego (6,1) na zasadowy (odpowiednio: 7,9 i 8,0). Również Fijałkowski i Kacprzak [35] stwierdzili, że w wyniku stosowania osadów ściekowych wzrastała wartość pH badanych gleb. W obiektach, gdzie zastosowano wzbogacenie dawką osadów w 30 i 50% proporcji wagowej po sześciu miesiącach trwania doświadczenia wartość pH zmieniła się ze średnio kwaśnego (pH=5,0) na obojętny (wartości pH wynosiły odpowiednio 6,66 i 6,76). Korzystne zmiany odczynu gleb po zastosowaniu osadów ściekowych zaobserwowali także Gondek [44] oraz Vaca i in. [156].

Związki organiczne i mineralne wprowadzane do gleby wraz z osadami ściekowymi mają wpływ na liczebność mikroorganizmów oraz przemiany enzymatyczne [97]. Fijałkowski i Kacprzak [35] stwierdzili, że osady ściekowe wzbogacają glebę w grzyby i promieniowce proporcjonalnie do zastosowanej dawki. Joniec i Furczak [66] na podstawie przeprowadzonych badań polowych

stwierdziły, że stosowanie osadów ściekowych powoduje wzrost ilości bakterii (przede wszystkim oligo- i makrotroficznymi) oraz grzybów celulolitycznych i nitkowatych. Autorki stwierdziły, że stosowanie wysokich dawek osadów nie spowodowało niekorzystnych zmian w rozwoju badanych grup mikroorganizmów. Pozytywny wpływ stosowania osadów ściekowych na rozwój rodzimych bakterii glebowych wykazały również badania Augustynowicza i in. [5], Nowaka i in. [98] oraz Loca i Geincherta [84].

Z badań przeprowadzonych przez Jezierską-Tys i Frąca [65] wynika, że liczebność bakterii i grzybów glebowych jest bezpośrednio związana z zawartością węgla organicznego oraz stosunkiem C:N występującym po wprowadzeniu osadów ściekowych. Sastre i in. [137] uważają, że osady ściekowe są cennym źródłem mikroorganizmów, które po obumarciu stają się dodatkowym źródłem materii organicznej. Natomiast Joniec i Furczak [66] stwierdziły, że wprowadzona do gleby materia organiczna, przy udziale mikroorganizmów, ulega stopniowemu przetworzeniu do form przyswajalnych dla roślin i w ten sposób wpływa na lepsze plonowanie roślin. Loc i Greinchert [84] zaobserwowali proporcjonalny wzrost liczebności mikroorganizmów wraz ze wzrostem dawki osadów ściekowych. Ponadto stwierdzili, że wprowadzana materia organiczna wpływała nie tylko na poprawę stanu fizycznego, chemicznego i biologicznego gleby ale także na wzrost i plonowanie roślin. Podobne spostrzeżenia wysunęli Fijałkowski i Kacprzak [35], którzy stwierdzili, że wprowadzanie do gleb osadów ściekowych wpływa na przewagę procesu mineralizacji substancji organicznej, co z kolei sprzyja uwalnianiu azotu przez mikroorganizmy i pełne wykorzystanie przez rośliny.

2.4 WPLYW NAWOŻENIA OSADAMI ŚCIEKOWYMI NA PLONOWANIE ROŚLIN

Jednym z głównych elementów wpływających na uzyskanie plonu o określonej wartości biologicznej i technologicznej jest dostarczenie roślinom odpowiedniej ilości składników pokarmowych. Wskaźnik ten może być także wyznacznikiem stosowania osadów ściekowych [45].

Mohammad i Athamneh [92] wskazują, że stosowanie osadów ściekowych wpływa korzystnie na ilość wytworzonej biomasy. Potwierdzają to wyniki badań uzyskane przez Gondka i Filipek-Mazur [48]. Cytowani autorzy w przeprowadzonym doświadczeniu wazonowym odnotowali istotnie wyższe sumaryczne plony biomasy kukurydzy na skutek zastosowanego nawożenia osadami ściekowymi lub ich mieszaninami z torfem. Średni plon biomasy nadziemnych części roślin kukurydzy, w odniesieniu do miejsc nienawożonych, był istotnie wyższy, średnio od 114% do 152%, natomiast korzeni od 59% do 114%. Podobne zależności Gondek i Filipek-Mazur [47] zaobserwowali oceniając wpływ stosowania osadów ściekowych na plony kukurydzy i gorczycy białej. W obiektach, gdzie stosowano nawożenie obornikiem oraz komunalnymi

osadami ściekowymi, odnotowano istotnie wyższe sumaryczne plony biomasy kukurydzy i gorczycy białej w porównaniu do obiektów nawożonych mineralnie.

Analogiczne zwiększenie plonów zaobserwowali także Fernandez i in. [33]. Autorzy ci wykazali, że na skutek zastosowanego nawożenia osadem ściekowym kumulatywny plon jęczmienia ozimego wyrażony jako liczba kłosów z jednostki powierzchni wzrósł o 47% w porównaniu do plonu otrzymanego z poletek nawożonych mineralnie. Kitczak i Czyż [72] stwierdzili, że mimo, iż stosowanie osadów ściekowych wpływa hamująco na obsadę roślin (traw), pozytywnie oddziałuje na pokrój roślin, barwę i podatność na porażenie. Gonddek i Filipek-Mazur [46] na podstawie przeprowadzonego doświadczenia wazonowego stwierdzili, że w obiektach gdzie stosowano komposty z osadów ściekowych sumaryczny plon ziarna owsa z trzech lat prowadzenia doświadczenia był ok. 2,5 krotnie wyższy niż w obiekcie kontrolnym i porównywalny z plonem w obiekcie nawożonym obornikiem. Istotne zwiększenie plonu biomasy roślin po zastosowaniu nawożenia komunalnymi osadami ściekowymi odnotowali także Jamil i in. [62], Tamrabet i in. [149] oraz Romanowska-Duda i Grzesik [122].

Gonddek [45] na podstawie przeprowadzonego badania polowego wykazał, że nawożenie komunalnym osadem ściekowym pochodzącym z oczyszczalni mechaniczno-biologicznej przyczyniło się do uzyskania istotnie wyższego plonu ziarna pszenicy niż w przypadku plonu pochodzącego z miejsc nawożonych osadem ściekowym pochodzącym z komunalnej oczyszczalni biologicznej oraz obornikiem. Ponadto wielkość plonu uzyskanego z poletek nawożonych osadem ściekowym z oczyszczalni mechaniczno-biologicznej była porównywalna do wielkości plonu uzyskanego z miejsc, gdzie stosowano wyłącznie nawożenie mineralne. Jakubus [61] na podstawie przeprowadzonego doświadczenia wazonowego potwierdziła plonotwórcze działanie osadu ściekowego, przy czym działanie określonego rodzaju osadu (z oczyszczalni mechanicznej lub mechaniczno-biologicznej) było zróżnicowane w zależności od gatunku badanej rośliny. Również Jamil i in. [62] wykazali znaczące zwiększenie plonu ziarna pod wpływem zastosowanego nawożenia osadami ściekowymi, średnio od ok. 44 do 110% w zależności od zastosowanej dawki nawożenia. Pozytywny wpływ na zwiększenie plonu roślin i/lub biomasy pod wpływem stosowania osadów ściekowych potwierdzają prace Lekana i Winiarskiej [83], Wójcikowskiej-Kapusty i in. [166] oraz Rebah i in. [120].

Stosowanie osadów ściekowych wpływa nie tylko na plon ziarna i biomasy roślin, ale także na wartość biologiczną tego plonu. Fernandez i in. [33] zaobserwowali, że na skutek zastosowanego nawożenia osadem ściekowym rośliny jęczmienia ozimego, w porównaniu do roślin nienawożonych lub nawożonych mineralnie, wykazywały wzrost zawartości suchej masy, zwiększenie zawartości białka całkowitego w tkankach młodych liści roślin oraz zwiększenie masy ziarna. Również z badań przeprowadzonych przez Gondka [45] wynika, że w obiektach gdzie stosowano nawożenie osadami ściekowymi lub ich mieszaninami, w porównaniu do obiektu kontrolnego, plon

pszenicy jarej charakteryzował się wyższą zawartością białka, azotu i siarki (średnio o 9,8; 12,3 i 10,3%). Jakubus [61] na podstawie przeprowadzonego doświadczenia wazonowego również zaobserwowała wyższą zawartość azotu i siarki w nasionach łubinu pod wpływem zastosowanego nawożenia osadem z oczyszczalni mechaniczno-biologicznej niż w obiektach nawożonych mineralnie (odpowiednio o 14 i 41%). Natomiast Hare i in. [55] stwierdzili, że nawożenie osadem ściekowym pośrednio wpływa na wzrost odporności roślin na niekorzystne warunki środowiska.

2.5 ROZKŁAD MATERII ORGANICZNEJ POCHODZĄCEJ Z OSADÓW ŚCIEKOWYCH

Szczególne miejsce w bilansie materii organicznej przypada tzw. zewnętrznej materii organicznej definiowanej jako całość materiału organicznego wprowadzanego do gleby w celu polepszenia jej jakości lub zachowania potencjału produkcyjnego. Do źródeł zewnętrznej materii organicznej zalicza się m.in. osady ściekowe, obornik, korę, słomę, torf i organiczne odpady komunalne, które w procesie humifikacji prowadzą do odnowienia substancji humusowych w glebie [49, 82].

Średnia zawartość substancji organicznej w osadach ściekowych waha się od 80% dla suchej masy osadów surowych do 50% suchej masy osadów ustabilizowanych [86]. Efektywność procesu degradacji materii organicznej zależy m.in. od rodzaju rozkładanej substancji, składu jakościowego mikroflory glebowej, dostępności tlenu, wody i substancji odżywczych, a także od temperatury oraz odczynu [74].

Brady i Well [22] podają, że osady ściekowe zawierają materiał humusowy, który po wymieszaniu z glebą ulega degradacji, przy czym proces ten może być prowadzony zarówno przez mikroorganizmy zawarte w glebie jak i/lub w tym materiale. Rozkład materii organicznej odbywa się na drodze mineralizacji i humifikacji, a kierunek i nasilenie tych procesów warunkowane jest również składem dostarczanego materiału [20]. Według Zaujeca [169] transformacje biochemiczne materii organicznej są wynikiem aktywności enzymatycznej różnych mikroorganizmów, natomiast biostabilność substratów zależy od ich fizycznych i chemicznych właściwości. Janzen i Kucey [63] podają, że szybkość rozkładu materiału organicznego może być różna w zależności od zawartości azotu, siarki, węgla (w tym także węgla rozpuszczalnego), ligniny i węglowodanów. Hattori i Mukai [57] zaobserwowali, że w zależności od pochodzenia oraz metody stabilizacji osady ściekowe różnią się odczynem, zawartością węgla organicznego i azotu ogółem oraz zawartością białka surowego, lipidów, węglowodanów, ligniny i hemicelulozy a także podatnością na tempo mineralizacji. Wpływ pochodzenia osadów ściekowych (metody stabilizacji) na tempo mineralizacji materii organicznej potwierdzają wyniki badań uzyskane przez Hsieh i in. [58]. Cytowani autorzy na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzili, że po sześciu tygodniach trwania

doświadczenia udział zmineralizowanego węgla w osadzie czynnym wynosił 26%, natomiast w osadzie przekompostowanym był ok. 3,3 razy niższy (udział ten wynosił 8%). Szybsza mineralizacja węgla organicznego zachodząca w osadzie czynnym, w porównaniu do osadu przefermentowanego była najprawdopodobniej spowodowana wyższą zawartością mobilnego węgla organicznego oraz niższą stabilnością materii organicznej. Podobne spostrzeżenia wysunęli także Ajwa i Tabatabai [1].

Fijałkowski i Kacprzak [35] uważają, że aplikacja osadów ściekowych sprzyja powstaniu przewagi procesu mineralizacji substancji organicznej. Hsieh i in. [58] wskazują, że po dodaniu do gleby materiału organicznego mikroorganizmy bardzo szybko wykorzystują łatwo dostępny węgiel organiczny przyspieszając w ten sposób tempo mineralizacji. Z badań przeprowadzonych przez Usman i in. [151] wynika, że szybkość mineralizacji materii organicznej wzrasta wraz ze wzrostem dawki stosowanych osadów ściekowych. Cytowani autorzy zaobserwowali, że w ciągu trzech miesięcy trwania doświadczenia całkowita ilość zmineralizowanego węgla organicznego w próbce kontrolnej wynosiła $0,23 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, natomiast w miejscu gdzie stosowano nawożenie osadem ściekowym w dawce $90 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ była około 13-krotnie wyższa ($2,93 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$). Szybsze tempo mineralizacji węgla organicznego w glebie nawożonej osadem ściekowym autorzy tłumaczą wyższą aktywnością mikrobiologiczną wynikającą najprawdopodobniej z podwyższonej zawartości rozpuszczalnych form węgla organicznego. Zawartość rozpuszczalnego węgla organicznego uznawana jest natomiast za jedno z najważniejszych źródeł energii dla drobnoustrojów glebowych [151].

Hattori i Mukai [57] na podstawie przeprowadzonych badań wazonowych stwierdzili, że w obiektach gdzie stosowano nawożenie osadami ściekowymi w proporcji wagowej 5% udziału osadu szybkość mineralizacji była nieznacznie wyższa niż w obiektach gdzie zastosowana dawka wynosiła 1%. Cytowani autorzy stwierdzili również, że szybkość mineralizacji substancji organicznej pochodzącej z osadów ściekowych była istotnie dodatnio skorelowana z całkowitą zawartością materii organicznej, zawartością węglowodanów i białka surowego (współczynniki korelacji wynosiły odpowiednio 0,88; 0,83 i 0,68). Istotnie statystycznie ujemne współczynniki korelacji odnotowano natomiast między szybkością mineralizacji, a zawartością ligniny i hemicelulozy (współczynniki korelacji wynosiły odpowiednio -0,77 i -0,67). Powszechnie wiadomo, że udział ligniny, ligninocelulozy oraz polisacharydów w osadach ściekowych wpływa hamująco na procesy rozkładu [105], jednakże substancje te stanowią rdzeń powstających struktur substancji humusowych [139].

2.6 OGRANICZENIA I POTENCJALNE ZAGROŻENIA W STOSOWANIU OSADÓW ŚCIEKOWYCH

Komunalne osady ściekowe posiadają wysoką wartość nawozową i glebotwórczą, zawierają duże ilości składników pokarmowych, a także

wpływają korzystnie na szereg właściwości chemicznych i biologicznych gleb [141]. Stosowanie osadów ściekowych niesie za sobą jednak pewne niebezpieczeństwo, ponieważ mogą być nośnikami szkodliwych składników i organizmów chorobotwórczych [40]. Ociepa i in. [100] podają, że długotrwałe i nieumiejętne nawożenie osadami ściekowymi może stanowić zagrożenie dla środowiska, powodując w konsekwencji skażenie gleb, pogorszenie jakości plonów oraz zanieczyszczenia wód.

Istotnym aspektem przyrodniczego wykorzystania osadów ściekowych jest zawartość w nich związków metali ciężkich. Jednym z głównych czynników decydujących o koncentracji metali ciężkich w osadach ściekowych jest udział w ogólnej ich ilości ścieków przemysłowych (głównie garbarskich, lakierniczych i hutniczych) i pochodzących z zakładów usługowych [13, 42]. Dahlin i in. [28] podają, że procesy bioakumulacji masy w komorach osadu czynnego oraz proces fermentacji metanowej mogą sprzyjać transformacji metali ciężkich ze ścieków do osadów. Całkowita zawartość metali ciężkich (przede wszystkim kadmu, chromu, cynku, miedzi, niklu i ołowiu) w osadach kształtuje się na poziomie 0,5 – 2,0% s.m. osadu, natomiast w niektórych przypadkach może wzrosnąć nawet do 4% [6].

Obecnie dopuszczalne zawartości metali ciężkich określone w rozporządzeniu Ministra Środowiska z dnia 6 lutego 2015 r. w sprawie komunalnych osadów ściekowych [132] stosowanych w rolnictwie oraz do rekultywacji gruntów na cele rolne wynoszą dla kadmu $20 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ s.m. osadów, dla miedzi $1000 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ s.m., dla niklu $300 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ s.m., dla ołowiu $750 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ s.m., dla cynku $2500 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ s.m., dla rtęci $16 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ s.m. a dla chromu $500 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ s.m..

W przypadku określania zawartości metali ciężkich w glebie, aktem prawnym regulującym m.in. graniczną zawartość metali ciężkich w glebach, stanowiącą punkt odniesienia dla ochrony gleb przed antropogenicznym zanieczyszczeniem, było rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 9 września 2002 r. w sprawie standardów jakości gleby oraz standardów jakości ziemi [134], a obecnie jest rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 1 września 2016 r. w sprawie sposobu prowadzenia oceny zanieczyszczenia powierzchni ziemi [128].

Związki metali ciężkich w osadach ściekowych mogą występować w postaci rozpuszczonej, wytrąconej, współstrąconej z tlenkami metali oraz zaadsorbowane lub zasocjowane na cząstkach resztek biologicznych [3]. Jak podaje Weiner i Matthew [158] mogą mieć formę tlenków, wodorotlenków, siarczków, fosforanów, krzemianów, organicznych połączeń w postaci kompleksów huminowych oraz związków z cukrami złożonymi.

Związki metali ciężkich pochodzących z osadów ściekowych mogą ulegać biologicznej akumulacji w glebie i w niesprzyjających warunkach tj. nadmiernego zakwaszenia mogą zostać przekształcone w formy łatwo dostępne dla roślin [38]. Antoniadis i Alloway [4] uważa, że nawożenie osadami ściekowymi może wpłynąć na zwiększoną akumulację metali ciężkich w plonie

roślin. Kabata-Pendias i Pendias [67] podają, że podczas mieszania osadu ściekowego z glebą formy metali ciężkich ulegają transformacji, co zmienia ich biodostępność. Według Wilk i Gworek [161] część związków metali ciężkich pochodzących z osadów ściekowych może być absorbowana przez substancję organiczną, minerały ilaste, utlenione formy żelaza i manganu oraz węglan wapnia, przyczyniając się do obniżenia ich zawartości w formie rozpuszczalnej.

Ociepa [101] na podstawie przeprowadzonego badania wazonowego stwierdziła, że nawożenie osadami ściekowymi i ich mieszaniną z torfem spowodowało niewielki wzrost zawartości niklu i cynku w glebie, odpowiednio o 4,9 i 3,0 mg·kg⁻¹, przy czym wzrost ten nie spowodował zmiany stopnia zanieczyszczenia gleby określonego na podstawie skali IUNG. Bańkowski i Hermann [7] analizując zmiany stanu gleb mineralnych po zastosowaniu ustabilizowanych wysokoreaktywnym tlenkiem wapniowym osadów ściekowych nie zaobserwowali mierzalnej zmiany zawartości metali ciężkich na glebach lekkich, średnich i ciężkich w przypadku zastosowania dawki osadu na poziomie 3000 kg s.m.·ha⁻¹. Również Bose i Bhattacharyya [19] na podstawie przeprowadzonych badań polowych wykazali, że zawartość Co, Cr, Mn, Ni i Pb w glebie regularnie nawożonej osadami ściekowymi była zbliżona do zawartości w obiekcie kontrolnym.

Ze względu na różnorodność związków organicznych występujących w osadach ściekowych, z punktu widzenia ekologicznego i toksykologicznego bardzo ważne znaczenie posiadają także mikrozanieczyszczenia organiczne [27]. Lista mikrozanieczyszczeń organicznych obejmuje 516 związków zidentyfikowanych w różnych osadach i pogrupowanych w 15 klasach. Do najważniejszych z potencjalnie obecnych w osadach ściekowych związków należą chlorowane węglowodory alifatyczne i aromatyczne, chlorofenole, wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne (WWA), polichlorowane bifenyly (PCB), polichlorowane dibenzodioksyny i dibenzofurany (PCDD/F), di(2-etyloheksylo-ftalen) (DEHP), prostołańcuchowe alkilosulfoniany (LAS), 2,2-bis(p-hydroksyfenylo)-propan (BPA), absorbowane organiczne związki chloru (AOX), pestycydy oraz nonylofenol(NP) [27, 56]. Związki te wykazują stosunkowo wysoką trwałość i zdolność do bioakumulacji w środowisku, a szybkość i stopień przemian tych związków w glebie jest bardzo zróżnicowany [27].

Zgodnie z opracowaniem *Working document on sludge* [163] w krajach Unii Europejskiej wprowadzono propozycje dopuszczalnych ilości zanieczyszczeń organicznych zawartych w osadach ściekowych. Wartości graniczne dotyczą między innymi sumy zawartości WWA, których stężenie nie może przekroczyć 6 mg·kg⁻¹ s.m., polichlorowanych bifenyli (0,8 mg·kg⁻¹), ftalanów (100 mg·kg⁻¹), alkilobenzosulfonianów sodu (2600 mg·kg⁻¹), nonylofenoli oraz etoksylianów nonylofenolu (50 mg·kg⁻¹), halogenowych związków organicznych (500 mg·kg⁻¹) oraz dioksyn i furanów – 100 ng TE·kg⁻¹ s.m.

Obecnie przepisy polskie, tj. ustawa z dnia 10 lipca 2007 r. o nawozach i nawożeniu [152], rozporządzenie Ministra Rolnictwa i Rozwoju Wsi z dnia

18 czerwca 2008 r. w sprawie wykonania niektórych przepisów ustawy o nawozach i nawożeniu [126] oraz rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 6 lutego 2015 r. w sprawie komunalnych osadów ściekowych [132] nie obejmują analizy mikrozanieczyszczeń w nawozach organicznych i organiczno-mineralnych, a także w komunalnych osadach ściekowych dopuszczonych do rolniczego wykorzystania.

Wykorzystanie osadów ściekowych w rolnictwie wiąże się z pewnym ryzykiem skażenia mikrobiologicznego i parazytologicznego gleby i wód gruntowych [73]. Dlatego oprócz parametrów chemicznych istotnym aspektem dla oceny przyrodniczego stosowania osadów ściekowych są ich parametry higieniczno-sanitarne [97].

Do zanieczyszczeń biologicznych wprowadzanych do gleby podczas stosowania osadów ściekowych zalicza się bakterie, wirusy, grzyby oraz formy inwazyjne, głównie pasożytów jelitowych [143].

Najliczniejszą grupą organizmów patogennych występującą w osadach są bakterie tj. *Escherichia coli*, *Salmonella spp.*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Clostridium perfringens*, *Bacillus anthracis*, *Listeria monocytogenes*, *Klebsiella spp.*, *Vibrio cholerae*, *Proteus spp.*, *Mycobacterium spp.*, *Leptospira spp.*, *Campylobacter spp.* i inne. Najczęściej spotykanymi wirusami znajdującymi się w osadach ściekowych są *Enterowirusy*, *Rotawirusy* i *Adenowirusy*. Natomiast wśród najczęściej spotykanych helmintów w osadach ściekowych wyróżnia się pierwotniaki (np. *Giardia lamblia*, *Cryptosporidium parvum*, *Toxoplasma gondii*, *Giardia intestinalis*), nicienie (*Ascaris lumbricoides*, *Toxocara canis*, *Toxocara cati*, *Trichuris trichura*), tasiemce (*Taenia solium*, *Hymenolepis nana*, *Echinococcus granulosus*) oraz przywry (*Schistosoma haematobium*, *Dicrocoelium*, *Fasciola hepatica*) [10, 23, 73].

Najistotniejszym zagrożeniem patogennym występującym w osadach ściekowych mogą być jaja pasożytów jelitowych tj. *Ascaris sp.*, *Trichuris sp.* oraz *Toxocara sp.*, które są określane mianem wskaźnika ATT, zaś wskaźnik ten wraz z *Salmonella spp.* jest określany jako czynnik ograniczający stosowanie osadów komunalnych [71]. Zgodnie z rozporządzeniem Ministra Środowiska z dnia 6 lutego 2015 r. w sprawie komunalnych osadów ściekowych [132] w przypadku stosowania osadów ściekowych w rolnictwie i do rekultywacji gruntów na cele rolne, wykorzystywane osady ściekowe nie mogą zawierać bakterii chorobotwórczych *Salmonella spp.* ani żywych jaj pasożytów jelitowych *Ascaris sp.*, *Trichuris sp.* oraz *Toxocara sp.*. Podobny zapis znajduje się w rozporządzeniu Ministra Rolnictwa i Rozwoju Wsi z dnia 18 czerwca 2008 r. w sprawie wykonania niektórych przepisów ustawy o nawozach i nawożeniu [126]. Zgodnie z tym rozporządzeniem w nawozach organicznych i organiczno-mineralnych niedopuszczalne jest występowanie żywych jaj pasożytów jelitowych (*Ascaris sp.*, *Trichuris sp.* oraz *Toxocara sp.*) oraz bakterii *Salmonella ssp.*

Kolejnym zagrożeniem wynikającym ze stosowania osadów ściekowych jest możliwość przedostania się do środowiska antybiotyków i środków

hormonalnych, powodujących pojawienie się opornych szczepów bakteryjnych posiadających tzw. geny oporności na antybiotyki [17, 24]. Barbusiński [8] uważa, że do podstawowych przyczyn pojawienia tego zjawiska zalicza się przede wszystkim zbyt duże zużycie antybiotyków, wykorzystywanych również w intensywnej hodowli zwierząt. Pozostałości tych środków trafiają do ścieków jako niezmetabolizowane frakcje i są tylko częściowo eliminowane w oczyszczalniach [24]. Chen i in. [24] uważają, że długotrwałe stosowanie osadów ściekowych może wpłynąć na zmiany środowiska mikroorganizmów glebowych przyczyniając się do wzrostu antybiotykoopornych bakterii, co pośrednio może przyczyniać się do rozprzestrzeniania chorób zakaźnych. W celu rozwiązania tego problemu należy wprowadzać procesy dezynfekcji ścieków i usuwania pozostałości antybiotyków zanim trafią do gleby, jednakże wymaga to podjęcia szczegółowych badań w tym kierunku [8, 24].

2.7 KORZYŚCI WYNIKAJĄCE ZE STOSOWANIA KOMPOSTÓW NA BAZIE KOMUNALNYCH OSADÓW ŚCIEKOWYCH

Kompostowanie osadów ściekowych jest złożonym, wielofunkcyjnym procesem pozytywnie wpływającym na stabilizację osadów, zniszczenie organizmów chorobotwórczych oraz redukcję masy i uwodnienia. Kompost na bazie komunalnych osadów ściekowych może być więc cennym materiałem nawozowym i strukturotwórczym [16]. Sullivan i in. [144] podają, że proces kompostowania powoduje przekształcenie materii organicznej w stosunkowo trwałe biologicznie produkt, który może stanowić dobre źródło składników odżywczych. Według Bernal i in. [9] węgiel organiczny zawarty w osadach ściekowych po procesie kompostowania jest stosunkowo oporny na degradację mikrobiologiczną. Natomiast Hue i Rajinth [59] uważają, że stosowanie kompostów na bazie osadów ściekowych dzięki zawartości związków alifatycznych o niskiej masie cząsteczkowej oddziałujących z minerałami glebowymi, wpływa na zwiększenie dostępności składników odżywczych.

Warman i Tremeer [157] podają, że kompost otrzymany z komunalnych osadów ściekowych, który spełnia normy jakościowe, wykazuje działanie podobne do tradycyjnych nawozów organicznych i naturalnych stosowanych w rolnictwie. Według Szejniuk [146] stosowanie kompostów z osadów ściekowych pozytywnie wpływa na właściwości gleb, ponieważ substancja organiczna pochodząca z kompostu pozostaje w glebie dłużej, wpływając na poprawę warunków powietrzno-wodnych oraz urodzajność gleb. Również Góra [51] uważa, że wprowadzenie do gleby substancji humusowych zawartych w kompoście powoduje zwiększenie zdolności sorpcyjnych, a tym samym jej urodzajności. Warman i Tremeer [157] wśród zalet stosowania kompostów z osadów ściekowych wymieniają m.in. działanie odkwaszające, wzrost zawartości wapnia, węgla i azotu oraz wzrost zawartości przyswajalnych form mikroelementów.

Górska i Stępień [52] na podstawie przeprowadzonego doświadczenia wazonowego stwierdziły, że zastosowanie kompostu z osadów ściekowych stymulowało aktywność mikrobiologiczną oraz poprawę właściwości fizykochemicznych gleb. Obiekty na których zastosowano kompost z osadów ściekowych, w odniesieniu do obiektów kontrolnych, charakteryzowały się istotnym wzrostem liczebności mezofilnych bakterii heterotroficznych (średnio o 40%) oraz wzrostem intensywności oddychania (średnio o 25%). Cytowane autorki stwierdziły także, że obiekty na których stosowano kompost z osadów ściekowych charakteryzowały się wyższą zawartością węgla, azotu ogółem, fosforu ogółem, odpowiednio o 8, 18 i 64 %.

Patorczyk-Pytlik i Gediga [103] stwierdzili, że próbki gleb pobrane z miejsc gdzie stosowano kompost z osadów ściekowych charakteryzowały się wyższą zawartością węgla organicznego (o ok. 18%) oraz wyższą zawartością rozpuszczalnych form fosforu i potasu (odpowiednio o 50 i 65%). Również Vaca i in. [156] zaobserwowali pozytywny wpływ kompostu z osadu ściekowego na właściwości gleb oraz plonowanie roślin. Autorzy ci w przeprowadzonych badaniach polowych zaobserwowali wzrost zawartości materii organicznej i azotu (odpowiednio o ok. 4 i 0,17 punktu procentowego) oraz zawartości wapnia i magnezu (odpowiednio o 0,92 i 1,1 $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$) po 180 dniach od zastosowania kompostu. Stwierdzili także, że w miejscach gdzie zastosowano nawożenie kompostem na bazie osadu ściekowego, w porównaniu do miejsc nawożonych mineralnie lub osadem ściekowym, plon kukurydzy był istotnie wyższy (odpowiednio o 1,68 i 1,13 $\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$). Podobne spostrzeżenia wysunęła Kozdraś [79], która na podstawie przeprowadzonych badań zaobserwowała wyraźny wzrost (średnio od 7 do 30%) plonu zielonej i suchej masy kukurydzy w miejscach, gdzie zastosowano kompost z osadów ściekowych w porównaniu do miejsc kontrolnych. Autorka stwierdziła, że stosowanie kompostu z osadów ściekowych umożliwia uzyskanie plonów na podobnym poziomie jak w przypadku mineralnego nawożenia (NPK), przy czym ze względu na wolniejsze działanie nawozu organicznego dawki te powinny być nieco wyższe, niż w nawożeniu mineralnym.

3. MATERIAŁ I METODY BADAŃ

3.1 MATERIAŁ BADAWCZY

W doświadczeniu zastosowano komunalne oraz przemysłowe osady ściekowe. Osady komunalne pochodziły z komunalnej oczyszczalni ścieków w Pile. Wykorzystywaną technologią było oczyszczanie mechaniczno-biologiczne, metodą osadu czynnego, ze wspomaganiami chemicznymi siarczanem żelaza III (preparat PIX). Stosowano osad będący mieszaniną osadu wstępnego (z części mechanicznej) oraz nadmiernego (z części biologicznej). Powstające osady zostały sklasyfikowane jako 19 08 05 *ustabilizowane komunalne osady ściekowe* [131, obecnie 133].

Osady pochodzenia przemysłowego klasyfikowane wówczas jako komunalne osady ściekowe (art. 3 pkt. 4 ustawy o odpadach) [155] to osady nadmierne z biologicznej oczyszczalni ścieków, należącej do wytwórni celulozy Frantschach w Świeciu, wytwarzającej papier metodą siarczynową.

Zakładowa oczyszczalnia oprócz ścieków przemysłowych prowadziła także oczyszczanie ścieków komunalnych z terenu miasta Świecia, dlatego osad został sklasyfikowany jako 19 08 05 *ustabilizowane komunalne osady ściekowe* [131, obecnie 133]. Zawartość suchej masy w przemysłowych osadach ściekowych po odwodnieniu w prasach odwadniających kształtowała się w zakresie od 12 do 18%. W celu przygotowania mieszanin do doświadczenia przetransportowano około 50 m³ osadu na teren placów magazynowych i technologicznych kompostowni w Pile. Następnie przeprowadzono procesy stabilizacji i wytworzono produkty zastosowane w doświadczeniu.

Przed zastosowaniem osady ściekowe zostały poddane różnym metodom stabilizacji i higienizacji:

a. fermentowanie (F)

Proces fermentacji komunalnego osadu ściekowego prowadzono przez około 90 dni w otwartych komorach fermentacyjnych wyposażonych w układy mieszadeł oraz system rur usuwających ciecz nadosadową. Zawartość suchej masy osadu w komorach wynosiła od 2 do 3%. Przebieg ekstensywnej, psychrofilowej fermentacji kontrolowano poprzez analizy odczynu utrzymując fazę fermentacji zasadowej. Tak ustabilizowany osad kierowano do wirówek dekantacyjnych ze wspomaganiami odwirowania flokulantami w postaci polielektrolitów kationowych. Odwodnienie osadu zapewniało otrzymanie zawartości suchej masy na poziomie od 16 do 18%. Jedynym celem prowadzenia procesu fermentacji było doprowadzenie do obumarcia mikroorganizmów osadu czynnego by umożliwić lepsze odwodnienie osadu w tym poprzez usunięcie wody wewnątrzkomórkowej.

b. kompostowanie (K)

Proces kompostowania przefermentowanych komunalnych osadów ściekowych odbywał się metodą pryzm przierzucanych z dodatkiem słomy pszennej i jęczmiennej w stosunku objętościowym 1:1. W celu zainicjowania i przyspieszenia procesu kompostowania do mieszaniny kompostowej dodano dojrzały kompost z poprzedniej szarży (10% obj.). Mieszanie składników odbywało się metodą usypową z zastosowaniem jednonaczyniowej ładowarki kołowej. Proces kompostowania trwał 3 miesiące. W celu zapewnienia odpowiedniego natlenienia w czasie kompostowania pryzmę mieszano 2 razy w tygodniu. Pryzmę pozostawiono do dojrzewania na okres 4 tygodni przed zastosowaniem.

c. alkalizowanie ługiem zielonym (Ł)

Ług zielony to rozpuszczony w wodzie lub w rozcieńczonym roztworze alkaliów (tzw. słabym ługu białym) stop sodowy z kotła regeneracyjnego składający się głównie z siarczku i węgla sodowego [96]. Jest to substancja stała o zielonkawym kolorze, uwodnieniu na poziomie 40-45% oraz pH=12. Wykorzystany do stabilizacji ług zielony powstał przy produkcji ługu białego w zakładach produkcji celulozy Frantschach w Świeciu i został sklasyfikowany jako odpad o kodzie 03 03 02 *osady i szlamy z produkcji celulozy* [131], obecnie odpad ten jest klasyfikowany jako 03 03 02 *osady wapienne i szlamy z ługu zielonego (z przetwarzania ługu czarnego)* [133].

Przemysłowe oraz przefermentowane komunalne osady ściekowe zostały wymieszane z ługiem zielonym w proporcji 4:1. Mieszanie osadu ściekowego z ługiem odbywało się metodą usypową z wykorzystaniem jednonaczyniowej ładowarki kołowej oraz rozrzutnika do obornika. Przygotowaną mieszaninę sezonowano przed zastosowaniem 3 tygodnie.

d. alkalizowanie wapnem palonym (W)

Przefermentowane komunalne osady ściekowe były mieszane z wapnem palonym (CaO) w dawce ok. 10-15% masowych. Do stabilizacji używano tlenku wapniowego wysokoreaktywnego wg PN-EN-459-2:2003 (t_{60} 0,5-1,5 min). Mieszanie substratów prowadzono mechanicznie w systemie przenośników ślimakowych w węźle wapnowania. Przygotowany osad był następnie sezonowany przez 3 tygodnie przed zastosowaniem.

e. alkalizowanie popiołem (P)

Zastosowany do stabilizacji popiół to odpad o kodzie ex10 01 99 odpady pochodzące ze spalania biomasy [130] pochodzący z kotła użytkowanego w fabryce celulozy Frantschach w Świeciu. Jest to popiół powstający w kotle fluidalnym opalanym paliwem pochodzenia drzewnego (kora i trociny) o odczynie zasadowym (pH>11).

Osady ściekowe pochodzenia przemysłowego zostały wymieszane z popiołem w proporcji 9:1. Mieszanie odbywało się metodą usypową, w skali przemysłowej, z zastosowaniem jednonaczyniowej ładowarki kołowej oraz rozrzutnika do obornika. Tak przygotowaną mieszaninę sezonowano przed zastosowaniem 3 tygodnie.

Zastosowany jako próba kontrolna obornik bydlęcy zawierał 20% suchej masy, 35,8% węgla organicznego oraz 2,14% azotu ogółem. Obornik pochodził z produkcji opasów w trybie ściółkowym w gospodarstwie rolnym w Będzitolwie i był sezonowany przed zastosowaniem 4 miesiące.

W zastosowanych osadach ściekowych nie wyizolowano bakterii z rodzaju *Salmonella*, nie stwierdzono także obecności żywych jaj pasożytów jelitowych (*Ascaris sp.*, *Trichuris sp.*, *Toxocara sp.*). Zastosowane osady ściekowe poddane różnym metodom stabilizacji spełniały kryteria określone w rozporządzeniu Ministra Środowiska z dnia 1 sierpnia 2002 r. w sprawie komunalnych osadów ściekowych [127; obecnie 132].

Badania wpływu sposobu stabilizacji materii organicznej w osadach ściekowych na żyzność gleby, na przykładzie uprawy kukurydzy, prowadzono w latach 2005-2007 na poletkach doświadczalnych o powierzchni 1000 m² (dł. 100 m, szer. 10 m) zlokalizowanych w miejscowości Będzitolwo na działce ewidencyjnej nr 130, na glebie płowej zaliczanej do klasy bonitacyjnej IVb. Poziom orno-próchniczny (Ap) badanej gleby wykazywał uziarnienie gliny piaszczystej [118], o zawartości frakcji piaszkowej 58,2%, pyłowej 37,2% oraz iłowej 4,6% (zał. 1). Właściwości chemiczne i fizykochemiczne badanej gleby przedstawiono w tabeli poniżej.

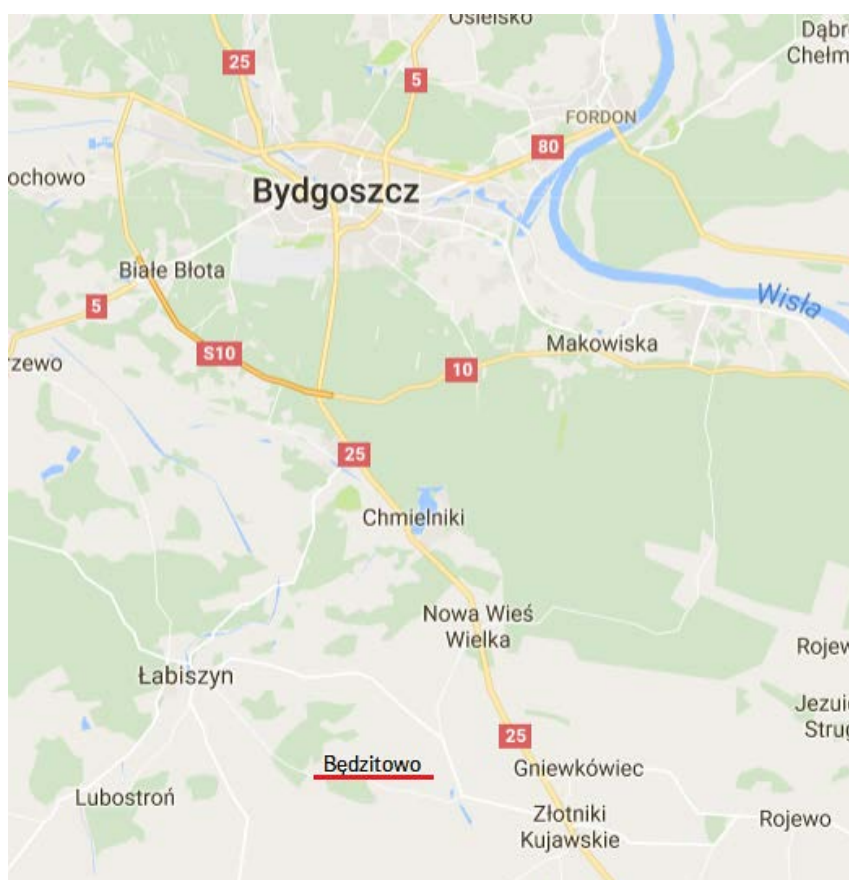
Tabela 1. Właściwości chemiczne i fizykochemiczne gleby

Lp.	Nazwa cechy	Jednostka	Wartość
1.	zawartość węgla organicznego	g·kg ⁻¹ s.m.	5,48
2.	zawartość azotu ogółem	g·kg ⁻¹ s.m.	0,63
3.	zawartość fosforu ogółem	g·kg ⁻¹ s.m.	0,28
4.	zawartość wapnia	g·kg ⁻¹ s.m.	0,81
5.	zawartość magnezu	g·kg ⁻¹ s.m.	0,70
6.	odczyn pH w H ₂ O	pH	6,5
7.	zawartość niklu (Ni)	mg·kg ⁻¹ s.m.	4,25
8.	zawartość chromu (Cr)	mg·kg ⁻¹ s.m.	4,59
9.	zawartość ołowiu (Pb)	mg·kg ⁻¹ s.m.	6,53
10.	zawartość cynku (Zn)	mg·kg ⁻¹ s.m.	87,25
11.	zawartość miedzi (Cu)	mg·kg ⁻¹ s.m.	9,10
12.	zawartość kadmu (Cd)	mg·kg ⁻¹ s.m.	0,18
13.	zawartość rtęci (Pb)	mg·kg ⁻¹ s.m.	0,02

Pod względem położenia fizyczno-geograficznego, według podziału Kondrackiego [78], miejscowość Będzitolwo położona jest w obrębie mezoregionu Równiny Inowrocławskiej i jest typowo rolniczym terenem. Lokalizację miejsca prowadzenia badań przedstawiono na rys. 2.

Biorąc pod uwagę podział Polski na regiony klimatyczne [165] miejscowość Będzitolwo leży w centralnej części Regionu Chełmińsko-Toruńskiego. Na tle regionów sąsiednich obszar ten wyróżnia się nieco większą częstością występowania dni z pogodą bardzo ciepłą z dużym zachmurzeniem – jest ich

średnio ponad 16 w roku. Charakterystyczne dla omawianego obszaru są także dni przymrozkowe, bardzo chłodne, z dużym zachmurzeniem bez opadów. W latach 1971-2000 w rejonie miejscowości Będzitowo dominowały wiatry z sektora zachodniego o prędkości $3,4-4,0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, usłonecznienie sięgało 1550-1650 godzin w roku, a średnia temperatura była stosunkowo wysoka i wynosiła ok. 8°C [85]. Omawiany obszar charakteryzuje się niską sumą opadów rocznych, które wynoszą ok. 550 mm [81]. Średnie temperatury powietrza i sumy opadów w rejonie Bydgoszczy w latach prowadzenia badań przedstawiono w zał. nr 2 i 3.



Rys. 2. Lokalizacja miejscowości Będzitowo [167]

W 2005 roku założono doświadczenie polowe, jednoczynnikowe w trzech powtórzeniach w układzie losowanych bloków (rys. 3). Wiosną w pierwszym roku doświadczenia zastosowano jednorazowo nawożenie osadami ściekowymi stabilizowanymi różnymi metodami. Zabieg został wykonany mechanicznie – rozrzutnikiem obornika.

I							II							III						
1	4	3	2	5	7	6	5	2	6	7	1	4	3	7	5	4	2	4	3	1
osad komunalny, fermentowany	osad komunalny, fermentowany, ługowany	osad komunalny, fermentowany, kompostowany	osad komunalny, fermentowany, wapnowany	osad przemysłowy z dodatkiem popiołu (10% obj.)	obornik – obiekt kontrolny	osad przemysłowy z dodatkiem ługu zielonego (20% obj.)	osad przemysłowy z dodatkiem popiołu (10% obj.)	osad komunalny, fermentowany, wapnowany	osad przemysłowy z dodatkiem ługu zielonego (20% obj.)	obornik – obiekt kontrolny	osad komunalny, fermentowany	osad komunalny, fermentowany, ługowany	osad komunalny, fermentowany, kompostowany	obornik – obiekt kontrolny	osad przemysłowy z dodatkiem popiołu (10% obj.)	osad komunalny, fermentowany, ługowany	osad komunalny, fermentowany, wapnowany	osad komunalny, fermentowany, kompostowany	osad przemysłowy z dodatkiem ługu zielonego (20% obj.)	osad komunalny, fermentowany

Rys. 3. Schemat układu doświadczenia

Dawki osadów ściekowych zostały ustalone na takim poziomie, by na wszystkich obiektach badawczych została wprowadzona taka sama ilość suchej masy materii organicznej. Przy ustalaniu dawek wzięto również pod uwagę zawartość metali ciężkich, tak by nie została przekroczona ich dopuszczalna zawartość określona w rozporządzeniu Ministra Środowiska z dnia 1 sierpnia 2002 roku w sprawie komunalnych osadów ściekowych [127, obecnie 132]. Po uwzględnieniu wyżej wymienionych kryteriów zastosowane dawki osadów ściekowych wynosiły 4,4 Mg suchej masy materii organicznej na hektar. Dawki zastosowanych osadów ściekowych zestawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Dawki zastosowanych osadów ściekowych stabilizowanych różnymi metodami

L.p.	Symbol	Rodzaj osadu	Dawka osadu [Mg ś.m*.ha ⁻¹]	Dawka osadu [Mg s.m.**.ha ⁻¹]	Dawka azotu ogółem [kg·ha ⁻¹]
1.	KF	osad komunalny, fermentowany	40,0	6,0	218,5
2.	KFW	osad komunalny, fermentowany, wapnowany	45,4	10,7	227,4
3.	KFK	osad komunalny, fermentowany, kompostowany	26,6	10,8	202,8
4.	KFL	osad komunalny fermentowany z dodatkiem ługu zielonego (20% obj.)	41,0	8,8	262,1
5.	PP	osad przemysłowy z dodatkiem popiołu (10% obj.)	42,0	6,1	231,0
6.	PŁ	osad ściekowy przemysłowy z dodatkiem ługu zielonego (20% obj.)	41,0	7,5	258,9
7.	K	próba kontrolna (obornik)	25,0	5,0	160,7

*ś.m. – świeża masa;

**s.m. – sucha masa

W kolejnych latach doświadczenia na poletkach uprawiano w monokulturze kukurydzą odmiany *Ikos* (FAO 220). Siew kukurydzy wykonywano mechanicznie pneumatycznym siewnikiem punktowym przy stałej szerokości międzyrzędzi wynoszącej 75 cm i gęstości siewu 7,9 nasion·m⁻². W każdym roku doświadczenia na wszystkich poletkach stosowano nawożenie azotowe w dawce 200 kg·ha⁻¹ (mocznik), nawożenie potasowe w dawce 280 kg·ha⁻¹ (sól potasowa) oraz nawożenie fosforowe w dawce 130 kg·ha⁻¹ (fosforan amonu 18-46).

3.2 METODY BADAŃ GLEB I OSADÓW ŚCIEKOWYCH

Realizację celu badań oraz sprawdzenie hipotezy badawczej przeprowadzono w oparciu o wykonanie następujących analiz:

- składu granulometrycznego gleby,
- zawartości węgla organicznego (Corg) w glebie,
- zawartości materii organicznej w osadach ściekowych,
- zawartości azotu ogółem (Nt) w osadach ściekowych i w glebie,
- zawartości fosforu ogółem w osadach ściekowych i w glebie,
- zawartości wapnia w osadach ściekowych i w glebie,
- zawartość magnezu w osadach ściekowych i w glebie,
- zawartości suchej masy w osadach ściekowych,
- zawartości metali ciężkich (Ni, Cr, Pb, Hg, Cu, Zn) w osadach ściekowych i w glebie,
- pH osadów ściekowych i gleby,
- średniego plonu ziarna,
- średniej długości roślin,
- średniej obsady roślin.

Zakres badań rozszerzono o analizę mikrobiologiczną w celu stwierdzenia pełnej higienizacji osadów stosowanych w rolnictwie. Wykonano następujące oznaczenia:

- bakterii rodzaju Salmonella,
- liczby żywych jaj pasożytów jelitowych ATT.

➤ Skład granulometryczny

W celu określenia grupy i podgrupy granulometrycznej gleby wykorzystano laserowy analizator Mastersizer 2000 ver. 5.60 (Malvern Instruments) z przystawką dyspergującą Hydro 2000MU. Pomiary realizowano przy następujących parametrach roboczych analizatora: współczynnik załamania światła próbki 1,520, dyspergant: woda destylowana, współczynnik załamania światła dysperganta: 1,330, model analizy: objętościowy rozkład wielkości cząstek, zakres pomiarowy: 0,020 do 2000,00 μm . Analizę wykonano na podstawie trzech losowo pobranych próbek gleby.

➤ Zawartość węgla organicznego (Corg)

Zawartość węgla organicznego w glebie oznaczono analizatorem TOCN Formacs – Primacs firmy Skalar (Breda, Holandia). Zawartość Corg podano w $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ s.m. gleby.

➤ **Zawartość materii organicznej**

Zawartość materii organicznej w osadach ściekowych oznaczono metodą strat prażenia w temperaturze 600°C zgodnie z PN-EN 12879:2004 (*Charakterystyka osadów ściekowych – Oznaczanie strat przy prażeniu suchej masy osadu*) [107]. Zawartość materii organicznej wyrażono w % s.m..

➤ **Zawartość azotu ogółem (Nt)**

Zawartość azotu ogółem w osadach ściekowych oznaczono metodą Kjeldahla zgodnie z PN-EN 13342:2002P (*Charakterystyka osadów ściekowych – Oznaczanie azotu Kjeldahla*) [109]. Zawartość azotu ogółem wyrażono w % s.m..

Zawartość azotu ogółem w glebie oznaczono analizatorem TOCN Formacs - Primacas firmy Skalar (Breda, Holandia). Zawartość Nt podano w g·kg⁻¹ s.m. gleby.

➤ **Zawartość fosforu ogółem**

Zawartość fosforu ogółem w osadach ściekowych oznaczono metodą spektrometrii absorpcji atomowej zgodnie z PN-EN 13346:2002 (*Charakterystyka osadów ściekowych – Oznaczanie pierwiastków śladowych i fosforu – Metody ekstrakcji wodą królewską*) [110].

Zawartość fosforu ogółem w glebie oznaczono metodą spektrofotometryczną zgodnie z PN-R-04023:1996 (*Analiza chemiczno-rolnicza gleby – Oznaczanie zawartości przyswajalnego fosforu w glebach mineralnych*) [115].

➤ **Zawartość wapnia**

Zawartość wapnia w osadach ściekowych i w glebie oznaczoną metodą spektrometrii absorpcji atomowej zgodnie z PN-EN ISO 11885 [112].

➤ **Zawartość magnezu**

Zawartość magnezu w osadach ściekowych i w glebie oznaczono metodą spektrometrii absorpcji atomowej zgodnie z PN-EN ISO 11885 [112].

➤ **Zawartość suchej masy**

Zawartość suchej masy w osadach ściekowych oznaczono metodą wagową zgodnie z PN-EN 12880:2004 (*Charakterystyka osadów ściekowych – Oznaczanie suchej pozostałości i zawartości wody*) [108]. Zawartość suchej masy wyrażono w %.

➤ Zawartość metali ciężkich

Zawartość metali ciężkich w osadach ściekowych oznaczono metodą spektrometrii absorpcji atomowej po mineralizacji mocnymi kwasami zgodnie z PN-EN 13657:2003 (*Charakteryzowanie odpadów – Roztworzenie w celu późniejszego oznaczania pierwiastków rozpuszczalnych w wodzie królewskiej*) [111]. Zawartość metali ciężkich w osadach ściekowych została wyrażona w $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ s.m..

Zawartość metali ciężkich w glebie oznaczono dwukrotnie: przed zastosowaniem osadów ściekowych oraz po zakończeniu doświadczenia.

Zawartość niklu, miedzi, ołowiu, cynku, kadmu i chromu w próbkach gleb oznaczono wg PN-ISO 11047:2001 (*Jakość gleby - Oznaczanie kadmu, chromu, kobaltu, miedzi, ołowiu, manganu, niklu i cynku w ekstraktach gleby wodą królewską*) [114].

Zawartość rtęci w próbkach gleb oznaczono przy zastosowaniu atomowej spektrometrii absorpcyjnej przy użyciu analizatora Lumex 03AE07081:2001. Zawartość metali ciężkich w glebie podano w $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ s.m.

➤ Odczyn

Badanie odczynu osadów ściekowych wykonano zgodnie z PN-EN 12176:2004 (*Charakterystyka osadów ściekowych – Oznaczanie wartości pH*) [106].

Badanie pH próbek gleb wykonano w zawiesinie wody destylowanej i gleby wg PN-ISO 10390:1997 (*Jakość gleby – Oznaczanie pH*) [113].

Pomiar pH wykonano przy użyciu pehametru MultiCal pH 540 GLP WTW.

➤ Pomiar średniej obsady roślin, średniej długości roślin oraz średniego plonu ziarna

W celu określenia średniej obsady policzono liczbę roślin na każdym poletku badawczym. Posuwając się zygzakiem po poletku co 10 m pobrano rośliny rosnące na odcinku 1,33 m bieżącego, co odpowiada 1m^2 poletka. Długość rzędu roślin do pobrania obliczono wg wzoru:

$$d = \frac{P \cdot 10000}{a}$$

gdzie:

d – długość rzędu roślin do pobrania,

P – powierzchnia, na której należy obliczyć obsadę roślin – 1m^2

a – szerokość międzyrzędzi w cm – 75 cm.

Pomiar wykonano przed zbiorem w fazie dojrzałości technicznej, w 4 powtórzeniach. Po pobraniu roślin zmierzono ich wysokość. Następnie przeprowadzono mechaniczny zbiór – kombajnem do kukurydzy (Claas). Bezpośrednio po zbiorze wykonano pomiar wilgotności ziarna przy użyciu miernika wilgotności Dickey-john Multigrain.

Wielkość plonu ziarna kukurydzy przeliczono do powierzchni 1 ha przy uwzględnieniu wilgotności na poziomie 14%.

➤ **Wykrywanie bakterii z rodzaju Salmonella**

Obecność bakterii z rodzaju Salmonella w osadach ściekowych wykrywano zgodnie z normą PN-Z 19000-1:2001 (*Jakość gleby – Ocena stanu sanitarnego gleby – Wykrywanie bakterii z rodzaju Salmonella*) [116].

➤ **Oznaczenie liczby żywych jaj pasożytów jelitowych ATT**

Liczbę żywych jaj pasożytów jelitowych ATT w osadach ściekowych oznaczono zgodnie z normą PN-Z 19000-4:2001 (*Jakość gleby – Ocena stanu sanitarnego gleby – Wykrywanie jaj pasożytów jelitowych Ascaris lumbricoides i Trichuris trichiura*) [117].

➤ **Analizy statystyczne**

Do obliczeń statystycznych wykorzystano arkusz kalkulacyjny Excel oraz arkusz Anal-War dla Excel (aut. F. Rudnickiego)

W celu określenia wpływu rodzaju zastosowanego osadu ściekowego na zawartość węgla organicznego, azotu ogółem i fosforu ogółem oraz wielkość plonu, wysokość i obsadę roślin przeprowadzono jednoczynnikową analizę wariancji z użyciem testu Tukeya, przy poziomie istotności $\alpha=0,05$.

Zmiany zawartości węgla organicznego i azotu ogółem w czasie określono na podstawie wyznaczonej funkcji regresji prostej oraz wyznaczonego współczynnika determinacji (R^2).

4. WYNIKI BADAŃ I DYSKUSJA

4.1 SKŁAD CHEMICZNY, MIKROBIOLOGICZNY I PARAZYTOLOGICZNY OSADÓW ŚCIEKOWYCH STABILIZOWANYCH RÓŻNYMI METODAMI

Wyniki badań składu chemicznego, mikrobiologicznego i parazytologicznego osadów ściekowych stabilizowanych różnymi metodami zestawiono w tabelach 3 – 8.

Tabela 3. Skład chemiczny i mikrobiologiczny osadu ściekowego komunalnego, fermentowanego (KF)

L.p.	Nazwa cechy	Jednostka	Wartość
1.	zawartość suchej masy	%	15,0
2.	zawartość materii organicznej	% s.m.	72,9
3.	zawartość azotu ogółem	% s.m.	3,6
4.	zawartość fosforu	% s.m.	2,8
5.	zawartość wapnia	% s.m.	0,75
6.	zawartość magnezu	% s.m.	0,27
7.	odczyn pH w H ₂ O	pH	6,6
8.	zawartość niklu (Ni)	mg·kg ⁻¹	6,85
9.	zawartość chromu (Cr)	mg·kg ⁻¹	7,59
10.	zawartość ołowiu (Pb)	mg·kg ⁻¹	12,21
11.	zawartość cynku (Zn)	mg·kg ⁻¹	244,66
12.	zawartość miedzi (Cu)	mg·kg ⁻¹	14,56
13.	zawartość kadmu (Cd)	mg·kg ⁻¹	1,98
14.	zawartość rtęci (Hg)	mg·kg ⁻¹	0,13
15.	<i>Salmonella sp.</i>	-	n.w.
16.	liczba żywych jaj <i>Ascaris sp.</i>	-	n.w.
17.	liczba żywych jaj <i>Trichuris sp.</i>	-	n.w.
18.	liczba żywych jaj <i>Toxocara sp.</i>	-	n.w.

*n.w. – nie wyizolowano

Osad ściekowy komunalny, fermentowany (KF) charakteryzował się zawartością materii organicznej na poziomie równym 72,9% s.m. i lekko kwaśnym odczynem. Zawartość makroskładników kształtowała się w zakresie od 0,27 % s.m. dla magnezu do 3,6 % s.m. dla azotu ogółem. Zawartość metali ciężkich wynosiła od 0,13 mg·kg⁻¹ (rtęć) do 244,66 mg·kg⁻¹ (cynk). W próbkach tego osadu nie wyizolowano bakterii z rodzaju *Salmonella sp.*, nie wykryto także obecności żywych jaj pasożytów jelitowych.

Tabela 4. Skład chemiczny i mikrobiologiczny osadu ściekowego komunalnego, fermentowanego, wapnowanego (KFW)

L.p.	Nazwa cechy	Jednostka	Wartość
1.	zawartość suchej masy	%	23,6
2.	zawartość materii organicznej	% s.m.	41,1
3.	zawartość azotu ogółem	% s.m.	2,1
4.	zawartość fosforu	% s.m.	1,7
5.	zawartość wapnia	% s.m.	6,4
6.	zawartość magnezu	% s.m.	0,36
7.	odczyn pH w H ₂ O	pH	12,3
8.	zawartość niklu (Ni)	mg·kg ⁻¹	7,15
9.	zawartość chromu (Cr)	mg·kg ⁻¹	8,66
10.	zawartość ołowiu (Pb)	mg·kg ⁻¹	10,52
11.	zawartość cynku (Zn)	mg·kg ⁻¹	215,26
12.	zawartość miedzi (Cu)	mg·kg ⁻¹	15,88
13.	zawartość kadmu (Cd)	mg·kg ⁻¹	1,87
14.	zawartość rtęci (Hg)	mg·kg ⁻¹	0,18
15.	<i>Salmonella sp.</i>	-	n.w.
16.	liczba żywych jaj <i>Ascaris sp.</i>	-	n.w.
17.	liczba żywych jaj <i>Trichuris sp.</i>	-	n.w.
18.	liczba żywych jaj <i>Toxocara sp.</i>	-	n.w.

*n.w. – nie wyizolowano

Osad ściekowy komunalny, fermentowany, wapnowany charakteryzował się zasadowym odczynem i zawierał 23,6% suchej masy oraz 41,1% s.m. materii organicznej. Zawartość makroskładników wahała się od 0,36 % s.m. (magnez) do 6,4 % s.m. (wapń). Zawartość metali ciężkich kształtowała się w zakresie od 0,18 mg·kg⁻¹ (rtęć) do 215,26 mg·kg⁻¹ (cynk). W próbkach osadu nie wyizolowano bakterii z rodzaju *Salmonella sp.*, nie wykryto również obecności żywych jaj pasożytów jelitowych.

Tabela 5. Skład chemiczny i mikrobiologiczny osadu ściekowego komunalnego, fermentowanego, kompostowanego (KFK)

L.p.	Nazwa cechy	Jednostka	Wartość
1.	zawartość suchej masy	%	40,6
2.	zawartość materii organicznej	% s.m.	41,1
3.	zawartość azotu ogółem	% s.m.	1,9
4.	zawartość fosforu	% s.m.	1,7
5.	zawartość wapnia	% s.m.	2,6
6.	zawartość magnezu	% s.m.	0,25
7.	odczyn pH w H ₂ O	pH	7,6
8.	zawartość niklu (Ni)	mg·kg ⁻¹ s.m.	8,60
9.	zawartość chromu (Cr)	mg·kg ⁻¹ s.m.	8,45
10.	zawartość ołowiu (Pb)	mg·kg ⁻¹ s.m.	11,46
11.	zawartość cynku (Zn)	mg·kg ⁻¹ s.m.	258,16
12.	zawartość miedzi (Cu)	mg·kg ⁻¹ s.m.	17,16
13.	zawartość kadmu (Cd)	mg·kg ⁻¹ s.m.	1,85
14.	zawartość rtęci (Hg)	mg·kg ⁻¹ s.m.	0,15
15.	<i>Salmonella sp.</i>	-	n.w.
16.	liczba żywych jaj <i>Ascaris sp.</i>	-	n.w.
17.	liczba żywych jaj <i>Trichuris sp.</i>	-	n.w.
18.	liczba żywych jaj <i>Toxocara sp.</i>	-	n.w.

*n.w. – nie wyizolowano

Zawartość materii organicznej w osadzie ściekowym komunalnym, fermentowanym, kompostowanym, podobnie jak osadzie komunalnym, fermentowanym, wapnowanym (tab. 4), wynosiła 41,1% s.m. Osad ten charakteryzował się zawartością suchej masy na poziomie 40,6% i odczynem zasadowym. Zawartość makroskładników kształtowała się w zakresie od 0,25% s.m. – magnez do 2,6 % s.m. – wapń. W grupie metali ciężkich najniższą zawartość odnotowano dla rtęci (0,15 mg·kg⁻¹ s.m.), a najwyższą dla cynku (258,16 mg·kg⁻¹ s.m.). W próbkach tego osadu nie wyizolowano bakterii z rodzaju *Salmonella sp.*, nie wykryto również obecności żywych jaj pasożytów jelitowych.

Tabela 6. Skład chemiczny i mikrobiologiczny osadu ściekowego komunalnego, fermentowanego z dodatkiem ługu zielonego (KFL)

L.p.	Nazwa cechy	Jednostka	Wartość
1.	zawartość suchej masy	%	21,5
2.	zawartość materii organicznej	% s.m.	50,1
3.	zawartość azotu ogółem	% s.m.	2,9
4.	zawartość fosforu	% s.m.	1,9
5.	zawartość wapnia	% s.m.	1,4
6.	zawartość magnezu	% s.m.	0,23
7.	odczyn pH w H ₂ O	pH	9,1
8.	zawartość niklu (Ni)	mg·kg ⁻¹ s.m.	7,24
9.	zawartość chromu (Cr)	mg·kg ⁻¹ s.m.	9,11
10.	zawartość ołowiu (Pb)	mg·kg ⁻¹ s.m.	15,29
11.	zawartość cynku (Zn)	mg·kg ⁻¹ s.m.	199,97
12.	zawartość miedzi (Cu)	mg·kg ⁻¹ s.m.	16,25
13.	zawartość kadmu (Cd)	mg·kg ⁻¹ s.m.	1,90
14.	zawartość rtęci (Hg)	mg·kg ⁻¹ s.m.	0,19
15.	<i>Salmonella sp.</i>	-	n.w.
16.	liczba żywych jaj <i>Ascaris sp.</i>	-	n.w.
17.	liczba żywych jaj <i>Trichuris sp.</i>	-	n.w.
18.	liczba żywych jaj <i>Toxocara sp.</i>	-	n.w.

*n.w. – nie wyizolowano

Osad ściekowy komunalny, fermentowany z dodatkiem ługu zielonego charakteryzował się zawartością materii organicznej na poziomie równym 50,1% s.m. i zasadowym odczynem. Zawartość makroskładników kształtowała się w zakresie od 0,23 % s.m. dla magnezu do 2,9 % s.m. dla azotu ogółem. Zawartość metali ciężkich wynosiła od 0,19 mg·kg⁻¹ (rtęć) do 199,97 mg·kg⁻¹ (cynk). W próbkach tego osadu nie wyizolowano bakterii z rodzaju *Salmonella sp.*, nie wykryto także obecności żywych jaj pasożytów jelitowych.

Tabela 7. Skład chemiczny i mikrobiologiczny osadu ściekowego przemysłowego z dodatkiem popiołu (PP)

L.p.	Nazwa cechy	Jednostka	Wartość
1.	zawartość suchej masy	%	14,6
2.	zawartość materii organicznej	% s.m.	72,0
3.	zawartość azotu ogółem	% s.m.	3,8
4.	zawartość fosforu	% s.m.	3,9
5.	zawartość wapnia	% s.m.	6,6
6.	zawartość magnezu	% s.m.	0,32
7.	odczyn pH w H ₂ O	pH	7,7
8.	zawartość niklu (Ni)	mg·kg ⁻¹ s.m.	3,62
9.	zawartość chromu (Cr)	mg·kg ⁻¹ s.m.	3,80
10.	zawartość ołowiu (Pb)	mg·kg ⁻¹ s.m.	12,80
11.	zawartość cynku (Zn)	mg·kg ⁻¹ s.m.	295,86
12.	zawartość miedzi (Cu)	mg·kg ⁻¹ s.m.	23,20
13.	zawartość kadmu (Cd)	mg·kg ⁻¹ s.m.	1,42
14.	zawartość rtęci (Hg)	mg·kg ⁻¹ s.m.	0,10
15.	<i>Salmonella sp.</i>	-	n.w.
16.	liczba żywych jaj <i>Ascaris sp.</i>	-	n.w.
17.	liczba żywych jaj <i>Trichuris sp.</i>	-	n.w.
18.	liczba żywych jaj <i>Toxocara sp.</i>	-	n.w.

*n.w. – nie wyizolowano

Zawartość materii organicznej w osadzie ściekowym przemysłowym z dodatkiem popiołu wynosiła 72,0% s.m. i była zbliżona do zawartości w osadzie ściekowym komunalnym, fermentowanym (tab. 3). Osad ten charakteryzował się zawartością suchej masy na poziomie 14,6% i odczynem zasadowym. Zawartość makroskładników kształtowała się w zakresie od 0,32% s.m. – magnez do 6,6% s.m. – wapń. W grupie metali ciężkich najniższą zawartość odnotowano dla rtęci (0,10 mg·kg⁻¹ s.m.), a najwyższą dla cynku (295,86 mg·kg⁻¹ s.m.). W próbkach osadu nie wyizolowano bakterii z rodzaju *Salmonella sp.*, nie wykryto również obecności żywych jaj pasożytów jelitowych.

Tabela 8. Skład chemiczny i mikrobiologiczny osadu ściekowego przemysłowego z dodatkiem ługu zielonego (PŁ)

L.p.	Nazwa cechy	Jednostka	Wartość
1.	zawartość suchej masy	%	18,3
2.	zawartość materii organicznej	% s.m.	55,6
3.	zawartość azotu ogółem	% s.m.	3,3
4.	zawartość fosforu	% s.m.	3,9
5.	zawartość wapnia	% s.m.	3,3
6.	zawartość magnezu	% s.m.	2,57
7.	odczyn pH w H ₂ O	pH	7,2
8.	zawartość niklu (Ni)	mg·kg ⁻¹ s.m.	3,35
9.	zawartość chromu (Cr)	mg·kg ⁻¹ s.m.	3,57
10.	zawartość ołowiu (Pb)	mg·kg ⁻¹ s.m.	11,89
11.	zawartość cynku (Zn)	mg·kg ⁻¹ s.m.	290,77
12.	zawartość miedzi (Cu)	mg·kg ⁻¹ s.m.	20,59
13.	zawartość kadmu (Cd)	mg·kg ⁻¹ s.m.	1,18
14.	zawartość rtęci (Hg)	mg·kg ⁻¹ s.m.	0,09
15.	<i>Salmonella sp.</i>	-	n.w.
16.	liczba żywych jaj <i>Ascaris sp.</i>	-	n.w.
17.	liczba żywych jaj <i>Trichuris sp.</i>	-	n.w.
18.	liczba żywych jaj <i>Toxocara sp.</i>	-	n.w.

*n.w. – nie wyizolowano

Osad ściekowy przemysłowy z dodatkiem ługu zielonego charakteryzował się zasadowym odczynem i zawierał 18,3% suchej masy oraz 55,6% s.m. materii organicznej. Zawartość makroskładników wynosiła odpowiednio 3,3% s.m. (azot ogółem), 3,9% s.m. (fosfor), 3,3% s.m. (wapń) i 2,57% s.m. (magnez). W grupie metali ciężkich, podobnie jak w pozostałych osadach ściekowych, najniższą zawartość odnotowano dla rtęci (0,09 mg·kg⁻¹ s.m.), a najwyższą dla cynku (290,77 mg·kg⁻¹ s.m.). W próbkach tego osadu nie wyizolowano bakterii z rodzaju *Salmonella sp.*, nie wykryto również obecności żywych jaj pasożytów jelitowych.

Tabela 9. Skład chemiczny i mikrobiologiczny obornika [50, 100]

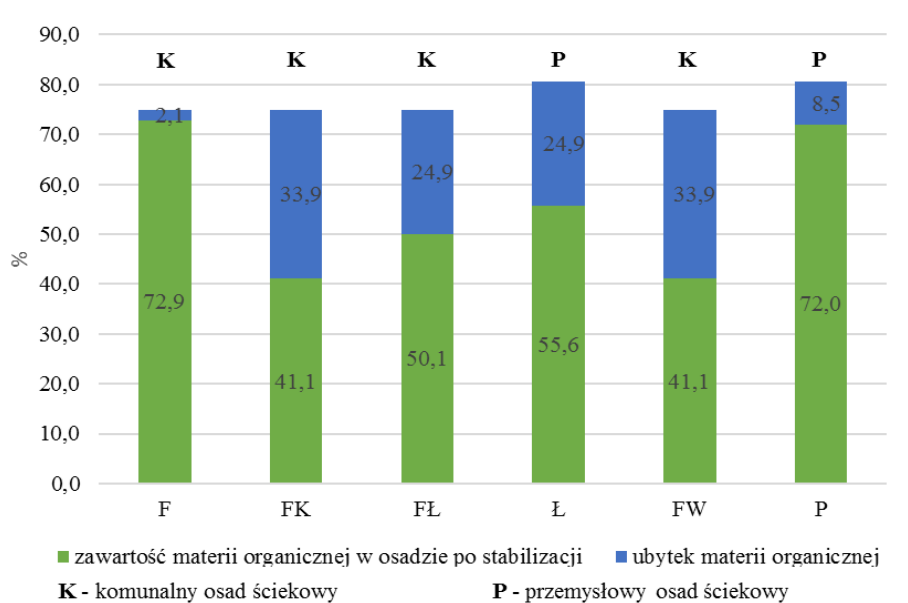
L.p.	Nazwa cechy	Jednostka	Wartość
1.	zawartość suchej masy	%	20,0
2.	zawartość materii organicznej	% s.m.	88,4
3.	zawartość azotu ogółem	% s.m.	2,14
4.	zawartość fosforu	% s.m.	0,14
5.	zawartość wapnia	% s.m.	0,36
6.	zawartość magnezu	% s.m.	0,11
7.	odczyn pH w H ₂ O	pH	7,2
8.	zawartość niklu (Ni)	mg·kg ⁻¹ s.m.	1,90
9.	zawartość chromu (Cr)	mg·kg ⁻¹ s.m.	45,30
10.	zawartość ołowiu (Pb)	mg·kg ⁻¹ s.m.	12,80
11.	zawartość cynku (Zn)	mg·kg ⁻¹ s.m.	156,00
12.	zawartość miedzi (Cu)	mg·kg ⁻¹ s.m.	5,38
13.	zawartość kadmu (Cd)	mg·kg ⁻¹ s.m.	1,80
14.	zawartość rtęci (Hg)	mg·kg ⁻¹ s.m.	0,12
15.	<i>Salmonella sp.</i>	-	n.w.
16.	liczba żywych jaj <i>Ascaris sp.</i>	-	n.w.
17.	liczba żywych jaj <i>Trichuris sp.</i>	-	n.w.
18.	liczba żywych jaj <i>Toxocara sp.</i>	-	n.w.

*n.w. – nie wyizolowano

Zastosowany w przedmiotowym doświadczeniu obornik charakteryzował się odczynem zasadowym i zawierał 20% suchej masy oraz 88,4% s.m. materii organicznej. Zawartość makroskładników kształtowała się w zakresie od 0,11% s.m. (magnez) do 2,14% s.m. (azot ogółem). W grupie metali ciężkich, podobnie jak we wszystkich zastosowanych w przedmiotowym doświadczeniu osadach ściekowych, najniższą zawartość odnotowano dla rtęci (0,12 mg·kg⁻¹ s.m.), a najwyższą dla cynku (156,00 mg·kg⁻¹ s.m.). W próbkach obornika nie wyizolowano bakterii z rodzaju *Salmonella sp.*, nie wykryto również obecności żywych jaj pasożytów jelitowych.

Wykorzystane w przeprowadzonym doświadczeniu osady ściekowe stabilizowane różnymi metodami spełniały kryteria określone w rozporządzeniu Ministra Środowiska z dnia 1 sierpnia 2002 r. w sprawie komunalnych osadów ściekowych [127, obecnie 132]

Jednym z podstawowych kryteriów oceny stopnia stabilizacji osadów ściekowych jest określenie ubytku materii organicznej [21]. Wpływ zastosowanej metody stabilizacji na zmiany zawartości materii organicznej w osadach ściekowych przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 4. Zmiany zawartości materii organicznej (% s.m.) w osadach ściekowych w zależności od zastosowanej metody stabilizacji

Najwyższym ubytkiem materii organicznej charakteryzował się osad poddany procesowi fermentacji i kompostowania oraz fermentacji i alkalizacji wapnem palonym – ubytek wynosił 33,9%. Wyniki te są zbliżone z wynikami uzyskanymi przez Kulikowską i Bilicką [80], które stwierdziły, że w procesie kompostowania następuje bardzo wyraźne obniżenie zawartości materii organicznej oraz Wysokińskiego i Kalembasy [168], którzy podają, że alkalizowanie osadu wapnem powoduje istotne obniżenie zawartości węgla organicznego.

4.2 WPLYW NAWOŻENIA OSADAMI ŚCIEKOWYMI STABILIZOWANYMI RÓŻNYMI METODAMI NA JAKOŚĆ GLEBY

Wzrost zawartości niklu, chromu, ołowiu, cynku, miedzi, kadmu i rtęci w wierzchniej warstwie gleby po zastosowaniu nawożenia osadami ściekowymi stabilizowanymi różnymi metodami obliczono na podstawie metody podanej przez Bańkowskiego i Hermanna [7], zgodnie ze wzorem:

$$M_r = \frac{d \cdot m_o}{S \cdot h_g \cdot 10000} + m_g$$

gdzie:

M_r – teoretyczne stężenie metalu w glebie po zastosowaniu osadów ściekowych [$\text{mg} \cdot \text{kg s.m.}^{-1}$],

d – zastosowana dawka osadów na powierzchni 1 ha gruntu [$\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$],

m_o – rzeczywiste stężenie metalu w osadzie przeznaczonym do zastosowania [$\text{mg} \cdot \text{kg s.m.}^{-1}$],

S – gęstość objętościowa gleby ($S=1680 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, przyjęto w oparciu o normę PN-81/B-03020),

h_g – głębokość warstwy gleby [m],

10000 – powierzchnia 1 ha [m^2],

m_g – rzeczywiste stężenie metalu w glebie przed zastosowaniem osadów ściekowych [$\text{mg} \cdot \text{kg s.m.}^{-1}$],

Wyniki obliczeń zestawiono w tabelach 10 – 16.

Tabela 10. Wzrost zawartości metali ciężkich w glebie po wprowadzeniu osadu ściekowego komunalnego, fermentowanego

Metal	Wartości dopuszczalne ilości metali w glebie średniej w 1 kg s.m. [mg]	Ilość metali ciężkich			Wzrost zawartości metalu w glebie [$\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ s.m.] po zastosowaniu osadu w dawce 6 Mg s.m.·ha ⁻¹	Zawartość metalu [$\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$] w glebie po zastosowaniu osadu w dawce 6 Mg s.m.·ha ⁻¹
		wprowadzanych do gleby z 6 Mg s.m. osadu ·ha ⁻¹ [g]	w 1 kg s.m. osadu [mg]	w 1 kg s.m. gleby [mg]		
nikiel	35	41,13	6,85	4,25	0,0098	4,26
chrom	75	45,57	7,59	4,59	0,0109	4,60
ołów	60	73,31	12,21	6,53	0,0175	6,55
cynk	120	1469,18	244,66	87,25	0,3498	87,60
miedź	50	87,42	14,56	9,10	0,0208	9,12
kadmi	2	11,89	1,98	0,18	0,0028	0,18
rtęć	1,2	0,78	0,13	0,02	0,0002	0,02

Wprowadzenie do gleby osadu ściekowego komunalnego, fermentowanego spowodowało wzrost zawartości analizowanych metali ciężkich. Najwyższy wzrost odnotowano dla zawartości cynku (o 0,3498 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), natomiast najniższy dla kadmu (o 0,0028 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) i rtęci (o 0,0002 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$). Wzrost zawartości pozostałych pierwiastków kształtował się w zakresie od 0,0098 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (nikiel) do 0,0208 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (miedź). W żadnym przypadku nie wystąpił wzrost zawartości metalu w glebie, powyżej wartości dopuszczalnej w glebie średniej (kolumna 1).

Tabela 11. Wzrost zawartości metali ciężkich w glebie po wprowadzeniu osadu ściekowego komunalnego, fermentowanego, wapnowanego

Metal	Wartości dopuszczalne ilości metali w glebie średniej w 1 kg s.m. [mg]	Ilość metali ciężkich			Wzrost zawartości metalu w glebie [mg·kg ⁻¹ s.m.] po zastosowaniu osadu w dawce 10,7 Mg s.m.·ha ⁻¹	Zawartość metalu [mg·kg ⁻¹] w glebie po zastosowaniu osadu w dawce 10,7 Mg s.m.·ha ⁻¹
		wprowadzanych do gleby z 10,7 Mg s.m. osadu ·ha ⁻¹ [g]	w 1 kg s.m. osadu [mg]	w 1 kg s.m. gleby [mg]		
nikiel	35	76,56	7,15	4,25	0,0182	4,27
chrom	75	92,67	8,66	4,59	0,0221	4,61
olów	60	112,57	10,52	6,53	0,0268	6,56
cynk	120	2303,88	215,26	87,25	0,5485	87,80
miedź	50	169,93	15,88	9,10	0,0405	9,14
kadm	2	20,01	1,87	0,18	0,0048	0,18
rtęć	1,2	1,93	0,18	0,02	0,0005	0,02

Podobnie, jak w przypadku zastosowania nawożenia osadem ściekowym komunalnym fermentowanym (tab.10), również wprowadzenie do gleby osadu komunalnego, fermentowanego, wapnowanego spowodowało wzrost zawartości analizowanych pierwiastków. Najwyższy wzrost odnotowano dla zawartości cynku – 0,5485 mg·kg⁻¹, a najniższy dla rtęci – 0,0005 mg·kg⁻¹ oraz kadmu – 0,0048 mg·kg⁻¹. Zawartość pozostałych pierwiastków zwiększyła się od 0,0182 mg·kg⁻¹ (nikiel) do 0,0405 mg·kg⁻¹ (miedź). W żadnym przypadku nie wystąpił wzrost zawartości metalu w glebie, powyżej wartości dopuszczalnej w glebie średniej (kolumna 1).

Tabela 12. Wzrost zawartości metali ciężkich w glebie po wprowadzeniu osadu ściekowego komunalnego, fermentowanego, kompostowanego

Metal	Wartości dopuszczalne ilości metali w glebie średniej w 1 kg s.m. [mg]	Ilość metali ciężkich			Wzrost zawartości metalu w glebie [$\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ s.m.] po zastosowaniu osadu w dawce $10,8 \text{ Mg s.m.} \cdot \text{ha}^{-1}$	Zawartość metalu [$\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$] w glebie po zastosowaniu osadu w dawce $10,8 \text{ Mg s.m.} \cdot \text{ha}^{-1}$
		wprowadzanych do gleby z $10,8 \text{ Mg s.m. osadu} \cdot \text{ha}^{-1}$ [g]	w 1 kg s.m. osadu [mg]	w 1 kg s.m. gleby [mg]		
nikiel	35	92,72	8,60	4,25	0,0221	4,27
chrom	75	91,09	8,45	4,59	0,0217	4,61
ołów	60	123,55	11,46	6,53	0,0294	6,56
cynk	120	2789,04	258,16	87,25	0,6641	87,91
miedź	50	185,00	17,16	9,10	0,0440	9,14
kadm	2	19,94	1,85	0,18	0,0047	0,18
rtęć	1,2	1,62	0,15	0,02	0,0004	0,02

Wprowadzenie do gleby osadu ściekowego komunalnego, fermentowanego, kompostowanego spowodowało najwyższy, spośród wszystkich zastosowanych osadów ściekowych, wzrost zawartości cynku – o $0,6641 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. Wzrost zawartości niklu, chromu, ołowiu i miedzi, podobnie jak w próbkach po zastosowaniu nawożenia osadem ściekowym komunalnym, fermentowanym, wapnowanym (tab. 11), kształtował się w zakresie od $0,0221$ do $0,0440 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, natomiast dla kadmu i rtęci odpowiednio o $0,0047 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ i $0,0004 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. W żadnym przypadku nie wystąpił wzrost zawartości metalu w glebie, powyżej wartości dopuszczalnej w glebie średniej (kolumna 1).

Tabela 13. Wzrost zawartości metali ciężkich w glebie po wprowadzeniu osadu ściekowego komunalnego, fermentowanego z dodatkiem ługu zielonego

Metal	Wartości dopuszczalne ilości metali w glebie średniej w 1 kg s.m. [mg]	Ilość metali ciężkich			Wzrost zawartości metalu w glebie [$\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ s.m.] po zastosowaniu osadu w dawce 8,8 Mg s.m. $\cdot \text{ha}^{-1}$	Zawartość metalu [$\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$] w glebie po zastosowaniu osadu w dawce 8,8 Mg s.m. $\cdot \text{ha}^{-1}$
		wprowadzanych do gleby z 8,8 Mg s.m. osadu $\cdot \text{ha}^{-1}$ [g]	w 1 kg s.m. osadu [mg]	w 1 kg s.m. gleby [mg]		
nikiel	35	63,67	7,24	4,25	0,0152	4,27
chrom	75	80,12	9,11	4,59	0,0191	4,61
olów	60	134,47	15,29	6,53	0,0320	6,56
cynk	120	1758,02	199,97	87,25	0,4186	87,67
miedź	50	142,91	16,25	9,10	0,0340	9,13
kadm	2	16,71	1,90	0,18	0,0040	0,18
rtęć	1,2	1,67	0,19	0,02	0,0004	0,02

Nawożenie osadem ściekowym komunalnym, fermentowanym, z dodatkiem ługu zielonego, podobnie jak nawożenie osadami KF, KFW i KFK (tab. 10, 11, 12), spowodowało wzrost zawartości analizowanych metali ciężkich. Najwyższy wzrost odnotowano dla zawartości cynku – $0,4186 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. Zaobserwowano także mniejszy, niż w przypadku nawożenia osadami KFK i KFW (tab. 11 i 12) wzrost zawartości miedzi (o $0,0340 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$). Zawartość niklu i chromu wzrosła o $0,0152$ i $0,0191 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, zawartość kadmu o $0,0040 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, a zawartość rtęci o $0,0004 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. W żadnym przypadku nie wystąpił wzrost zawartości metalu w glebie, powyżej wartości dopuszczalnej w glebie średniej (kolumna 1).

Tabela 14. Wzrost zawartości metali ciężkich w glebie po wprowadzeniu osadu ściekowego przemysłowego z dodatkiem popiołu

Metal	Wartości dopuszczalne ilości metali w glebie średniej w 1 kg s.m. [mg]	Ilość metali ciężkich			Wzrost zawartości metalu w glebie [mg·kg ⁻¹ s.m.] po zastosowaniu osadu w dawce 6,1 Mg s.m.·ha ⁻¹	Zawartość metalu [mg·kg ⁻¹] w glebie po zastosowaniu osadu w dawce 6,1 Mg s.m.·ha ⁻¹
		wprowadzanych do gleby z 6,1 Mg s.m. osadu ·ha ⁻¹ [g]	w 1 kg s.m. osadu [mg]	w 1 kg s.m. gleby [mg]		
nikiel	35	22,12	3,62	4,25	0,0053	4,26
chrom	75	23,22	3,80	4,59	0,0055	4,60
ołów	60	78,22	12,80	6,53	0,0186	6,55
cynk	120	1808,06	295,86	87,25	0,4305	87,68
miedź	50	141,78	23,20	9,10	0,0338	9,13
kadm	2	8,68	1,42	0,18	0,0021	0,18
rtęć	1,2	0,61	0,10	0,02	0,0001	0,02

Zawartość cynku po wprowadzeniu do gleby osadu ściekowego przemysłowego z dodatkiem popiołu wzrosła o 0,4305 mg·kg⁻¹. Wzrost zawartości niklu, chromu i ołowiu wynosił odpowiednio 0,0053, 0,0055 i 0,186 mg·kg⁻¹ i był niższy niż po wprowadzeniu osadu ściekowego komunalnego, fermentowanego, wapnowanego (tab. 11) oraz osadu komunalnego, fermentowanego, kompostowanego (tab. 12). Wzrost zawartości miedzi był zbliżony do wzrostu po zastosowaniu osadu ściekowego komunalnego, fermentowanego z dodatkiem ługu zielonego (tab. 13) – o 0,0338 mg·kg⁻¹. Natomiast wzrost zawartości kadmu i rtęci był zbliżony do wzrostu po zastosowaniu osadu ściekowego komunalnego, fermentowanego (tab. 10) oraz osadu ściekowego przemysłowego z dodatkiem ługu zielonego (tab. 15), odpowiednio 0,0021 mg·kg⁻¹ oraz 0,0001 mg·kg⁻¹. W żadnym przypadku nie wystąpił wzrost zawartości metalu w glebie, powyżej wartości dopuszczalnej w glebie średniej (kolumna 1).

Tabela 15. Wzrost zawartości metali ciężkich w glebie po wprowadzeniu osadu ściekowego przemysłowego z dodatkiem ługu zielonego

Metal	Wartości dopuszczalne ilości metali w glebie średniej w 1 kg s.m. [mg]	Ilość metali ciężkich			Wzrost zawartości metalu w glebie [mg·kg ⁻¹ s.m.] po zastosowaniu osadu w dawce 7,5 Mg s.m.·ha ⁻¹	Zawartość metalu [mg·kg ⁻¹] w glebie po zastosowaniu osadu w dawce 7,5 Mg s.m.·ha ⁻¹
		wprowadzanych do gleby z 7,5 Mg s.m.·osadu·ha ⁻¹ [g]	w 1 kg s.m. osadu [mg]	w 1 kg s.m. gleby [mg]		
nikiel	35	25,15	3,35	4,25	0,0060	4,26
chrom	75	26,80	3,57	4,59	0,0064	4,60
ołów	60	89,26	11,89	6,53	0,0213	6,55
cynk	120	2182,39	290,77	87,25	0,5196	87,77
miedź	50	154,57	20,59	9,10	0,0368	9,14
kadm	2	8,86	1,18	0,18	0,0021	0,18
rtęć	1,2	0,68	0,09	0,02	0,0002	0,02

Wprowadzenie do gleby osadu ściekowego przemysłowego z dodatkiem ługu zielonego spowodowało wzrost zawartości cynku na poziomie zbliżonym do wzrostu po zastosowaniu osadu ściekowego komunalnego, fermentowanego, wapnowanego (tab. 11) – o 0,5196 mg·kg⁻¹. Zawartość niklu i chromu wzrosła o 0,0060 mg·kg⁻¹ i o 0,0064 mg·kg⁻¹. Wzrost zawartości ołowiu, miedzi, kadmu i rtęci kształtował się na poziomie zbliżonym do wzrostu po zastosowaniu osadu przemysłowego z dodatkiem popiołu (tab. 14), odpowiednio o 0,0213 mg·kg⁻¹, 0,0368 mg·kg⁻¹, 0,0021 mg·kg⁻¹ i 0,0002 mg·kg⁻¹. W żadnym przypadku nie wystąpił wzrost zawartości metalu w glebie, powyżej wartości dopuszczalnej w glebie średniej (kolumna 1).

Tabela 16. Wzrost zawartości metali ciężkich w glebie po wprowadzeniu obornika

Metal	Wartości dopuszczalne ilości metali w glebie średniej w 1 kg s.m. [mg]	Ilość metali ciężkich			Wzrost zawartości metalu w glebie [mg·kg ⁻¹ s.m.] po zastosowaniu obornika w dawce 5 Mg s.m.·ha ⁻¹	Zawartość metalu [mg·kg ⁻¹] w glebie po zastosowaniu obornika w dawce 5 Mg s.m.·ha ⁻¹
		wprowadzanych do gleby z 5 Mg s.m. obornika ·ha ⁻¹ [g]	w 1 kg s.m. obornika [mg]	w 1 kg s.m. gleby [mg]		
nikiel	35	9,5	1,90	4,25	0,0023	4,25
chrom	75	226,5	45,30	4,59	0,0539	4,64
ołów	60	64,00	12,80	6,53	0,0152	6,55
cynek	120	780,00	156,00	87,25	0,1857	87,44
miedź	50	26,90	5,38	9,10	0,0064	9,11
kadm	2	9,00	1,80	0,18	0,0021	0,18
rtęć	1,2	0,60	0,12	0,02	0,0001	0,02

Nawożenie obornikiem, podobnie jak nawożenie osadami ściekowymi stabilizowanymi różnymi metodami, spowodowało wzrost zawartości analizowanych metali ciężkich w glebie. Najwyższy wzrost odnotowano dla zawartości cynku (0,1857 mg·kg⁻¹), a najniższy dla zawartości kadmu i rtęci (odpowiednio 0,0021 i 0,0001 mg·kg⁻¹). Zaobserwowano, że wprowadzenie obornika spowodowało wyższy, w odniesieniu do wzrostu po zastosowaniu osadów ściekowych stabilizowanych różnymi metodami, wzrost zawartości chromu – o 0,539 mg·kg⁻¹.

Wprowadzenie do gleby określonych dawek osadów ściekowych stabilizowanych różnymi metodami nie spowodowało przekroczenia dopuszczalnych zawartości metali ciężkich w glebie średniej określonej w rozporządzeniu Ministra Środowiska z dnia 1 sierpnia 2002 r. w sprawie komunalnych osadów ściekowych [127] oraz w obecnie obowiązującym rozporządzeniu Ministra Środowiska z dnia 6 lutego 2015 r. w sprawie komunalnych osadów ściekowych [132].

Wzrost zawartości materii organicznej, azotu ogółem, fosforu ogółem, wapnia i magnezu po zastosowaniu nawożenia osadami ściekowymi stabilizowanymi różnymi metodami obliczono i zestawiono w tabelach 17 – 23.

Tabela 17. Wzrost zawartości materii organicznej oraz makroelementów po zastosowaniu osadu ściekowego komunalnego fermentowanego

Składnik	Ilość składników pokarmowych		Wzrost zawartości składnika w glebie [$\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ s.m.] po zastosowaniu osadu w dawce $6 \text{ Mg s.m.} \cdot \text{ha}^{-1}$	Ilość składników pokarmowych wprowadzanych do gleby z $6 \text{ Mg s.m. osadu} [\text{kg}]$	Zawartość składnika [$\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$] w glebie po zastosowaniu osadu w dawce $6 \text{ Mg s.m.} \cdot \text{ha}^{-1}$
	w $1 \text{ kg s.m. osadu} [\text{g}]$	w $1 \text{ kg s.m. gleby} [\text{g}]$			
materia organiczna	728,90	9,46	1,042	4376,3	10,50
azot ogółem	36,44	0,63	0,052	218,8	0,68
fosfor ogółem	27,71	0,28	0,040	166,4	0,32
wapń	7,55	0,81	0,011	45,3	0,82
magnez	2,70	0,70	0,004	16,2	0,70

Wprowadzenie do gleby osadu ściekowego komunalnego fermentowanego wpłynęło w niewielkim stopniu pozytywnie na jakość badanej gleby. Stwierdzono, że zastosowanie tego rodzaju osadu spowodowało wzrost zawartości materii organicznej o $1,042 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, a makroelementów od $0,004 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (magnez) do $0,052 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (azot).

Tabela 18. Wzrost zawartości materii organicznej oraz makroelementów po zastosowaniu osadu ściekowego komunalnego fermentowanego, wapnowanego

Składnik	Ilość składników pokarmowych		Wzrost zawartości składnika w glebie [$\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ s.m.] po zastosowaniu osadu w dawce 10,7 Mg s.m. $\cdot\text{ha}^{-1}$	Ilość składników pokarmowych wprowadzanych do gleby z 10,7 Mg s.m. osadu [kg]	Zawartość składnika [$\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$] w glebie po zastosowaniu osadu w dawce 10,7 Mg s.m. $\cdot\text{ha}^{-1}$
	w 1 kg s.m. osadu [g]	w 1 kg s.m. gleby [g]			
materia organiczna	411,30	9,46	1,048	4401,2	10,51
azot ogółem	21,24	0,63	0,054	227,3	0,68
fosfor ogółem	17,01	0,28	0,043	182,0	0,32
wapń	64,16	0,81	0,163	686,5	0,97
magnez	3,57	0,70	0,009	38,2	0,71

Wprowadzenie do gleby osadu ściekowego komunalnego fermentowanego, wapnowanego spowodowało wzrost zawartości materii organicznej o $1,048 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$. Zawartość azotu ogółem, fosforu ogółem i magnezu wzrosła o $0,054 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, $0,043 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ i $0,009 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$. Zaobserwowano, że nawożenie osadem ściekowym komunalnym, fermentowanym, wapnowanym spowodowało najwyższy, spośród wszystkich zastosowanych osadów ściekowych, wzrost zawartości wapnia – o $0,163 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$. Stosunkowo wysoki wzrost zawartości wapnia po wprowadzeniu tego osadu był spowodowany wykorzystaniem CaO w procesie stabilizacji osadów ściekowych.

Tabela 19. Wzrost zawartości materii organicznej oraz makroelementów po zastosowaniu osadu ściekowego komunalnego fermentowanego, kompostowanego

Składnik	Ilość składników pokarmowych		Wzrost zawartości składnika w glebie [$\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ s.m.] po zastosowaniu osadu w dawce 10,8 Mg s.m. $\cdot\text{ha}^{-1}$	Ilość składników pokarmowych wprowadzanych do gleby z 10,8 Mg s.m. osadu [kg]	Zawartość składnika [$\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$] w glebie po zastosowaniu osadu w dawce 10,8 Mg s.m. $\cdot\text{ha}^{-1}$
	w 1 kg s.m. osadu [g]	w 1 kg s.m. gleby [g]			
materia organiczna	411,30	9,46	1,056	4434,2	10,52
azot ogółem	18,75	0,63	0,048	202,1	0,68
fosfor ogółem	16,71	0,28	0,043	180,2	0,32
wapń	25,98	0,81	0,067	280,1	0,88
magnez	2,47	0,70	0,006	26,6	0,71

Wprowadzenie do gleby osadu ściekowego komunalnego, fermentowanego, kompostowanego spowodowało najwyższy, na tle pozostałych zastosowanych osadów ściekowych, wzrost zawartości materii organicznej – o $1,056 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$. Zawartość makroskładników wzrosła stosunkowo niewiele, odpowiednio o $0,048 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ (azot ogółem) $0,043 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ (fosfor ogółem), $0,067 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ (wapń) oraz o $0,006 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ (magnez).

Tabela 20. Wzrost zawartości materii organicznej oraz makroelementów po zastosowaniu osadu ściekowego komunalnego fermentowanego z dodatkiem ługu zielonego

Składnik	Ilość składników pokarmowych		Wzrost zawartości składnika w glebie [$\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ s.m.] po zastosowaniu osadu w dawce 8,8 Mg s.m. $\cdot\text{ha}^{-1}$	Ilość składników wprowadzanych do gleby z 8,8 Mg s.m. osadu [kg]	Zawartość składnika [$\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$] w glebie po zastosowaniu osadu w dawce 8,8 Mg s.m. $\cdot\text{ha}^{-1}$
	w 1 kg s.m. osadu [g]	w 1 kg s.m. gleby [g]			
materia organiczna	500,60	9,46	1,048	4402,5	10,51
azot ogółem	29,81	0,63	0,062	262,2	0,69
fosfor ogółem	18,52	0,28	0,039	162,9	0,32
wapń	14,04	0,81	0,029	123,5	0,84
magnez	2,33	0,70	0,005	20,5	0,70

Wzrost zawartości materii organicznej po wprowadzeniu osadu ściekowego komunalnego, fermentowanego z dodatkiem ługu zielonego kształtował się na takim samym poziomie jak po zastosowaniu osadu ściekowego komunalnego, fermentowanego, wapnowanego (tab. 18) oraz osadu ściekowego przemysłowego z dodatkiem popiołu (tab. 21) i wynosił $1,048 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$. Zaobserwowano także wyższy, niż w przypadku zastosowania pozostałych osadów ściekowych stabilizowanych różnymi metodami, wzrost zawartości azotu ogółem – o $0,062 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$. Zawartość fosforu ogółem, wapnia i magnezu wzrosła odpowiednio o $0,039 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, $0,029 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ i $0,005 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$.

Tabela 21. Wzrost zawartości materii organicznej oraz makroelementów po zastosowaniu osadu ściekowego przemysłowego z dodatkiem popiołu

Składnik	Ilość składników pokarmowych		Wzrost zawartości składnika w glebie [$\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ s.m.] po zastosowaniu osadu w dawce $6,1 \text{ Mg s.m.} \cdot \text{ha}^{-1}$	Ilość składników wprowadzanych do gleby z $6,1 \text{ Mg s.m.}$ osadu [kg]	Zawartość składnika [$\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$] w glebie po zastosowaniu osadu w dawce $6,1 \text{ Mg s.m.} \cdot \text{ha}^{-1}$
	w 1 kg s.m. osadu [g]	w 1 kg s.m. gleby [g]			
materia organiczna	720,00	9,46	1,048	4399,9	10,51
azot ogółem	38,00	0,63	0,055	232,2	0,69
fosfor ogółem	3,92	0,28	0,006	24,0	0,29
wapń	6,56	0,81	0,010	40,1	0,82
magnez	2,84	0,70	0,004	17,4	0,70

Wprowadzenie do gleby osadu ściekowego przemysłowego z dodatkiem popiołu skutkowało wzrostem zawartości materii organicznej o $1,048 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, azotu ogółem o $0,055 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, wapnia o $0,010 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, a magnezu o $0,004 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$. Należy podkreślić, że z zastosowanie osadu ściekowego przemysłowego z dodatkiem popiołu, na tle pozostałych zastosowanych osadów ściekowych, skutkowało najniższym wzrostem zawartości fosforu ogółem – o $0,006 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$.

Tabela 22. Wzrost zawartości materii organicznej oraz makroelementów po zastosowaniu osadu ściekowego przemysłowego z dodatkiem ługu zielonego

Składnik	Ilość składników pokarmowych		Wzrost zawartości składnika w glebie [$\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ s.m.] po zastosowaniu osadu w dawce $6,1 \text{ Mg s.m.} \cdot \text{ha}^{-1}$	Ilość składników pokarmowych wprowadzanych do gleby z $6,1 \text{ Mg s.m.}$ osadu [kg]	Zawartość składnika [$\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$] w glebie po zastosowaniu osadu w dawce $6,1 \text{ Mg s.m.} \cdot \text{ha}^{-1}$
	w 1 kg s.m. osadu [g]	w 1 kg s.m. gleby [g]			
materia organiczna	556,00	9,46	0,994	4173,9	10,45
azot ogółem	33,00	0,63	0,059	247,7	0,69
fosfor ogółem	3,92	0,28	0,007	29,4	0,29
wapń	5,00	0,81	0,009	37,5	0,82
magnez	2,57	0,70	0,005	19,3	0,70

Nawożenie osadem ściekowym przemysłowym z dodatkiem ługu zielonego spowodowało najniższy, spośród zastosowanych w przedmiotowym doświadczeniu osadów ściekowych stabilizowanych różnymi metodami, wzrost zawartości materii organicznej – o $0,994 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$. Wzrost zawartości makroskładników kształtował się na poziomie zbliżonym do wzrostu po wprowadzeniu osadu ściekowego przemysłowego z dodatkiem popiołu (tab. 21) i wynosił $0,059 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ dla azotu ogółem, $0,007 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ dla fosforu ogółem, $0,009 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ dla wapnia i $0,005 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ dla magnezu.

Tabela 23. Wzrost zawartości materii organicznej oraz makroelementów po zastosowaniu obornika

Składnik	Ilość składników pokarmowych		Wzrost zawartości składnika w glebie [$\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ s.m.] po zastosowaniu osadu w dawce 6,1 Mg s.m. $\cdot \text{ha}^{-1}$	Ilość składników pokarmowych wprowadzanych do gleby z 6,1 Mg s.m. osadu [kg]	Zawartość składnika [$\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$] w glebie po zastosowaniu osadu w dawce 6,1 Mg s.m. $\cdot \text{ha}^{-1}$
	w 1 kg s.m. osadu [g]	w 1 kg s.m. gleby [g]			
materia organiczna	884,00	9,46	1,052	4420,0	10,51
azot ogółem	21,40	0,63	0,025	160,7	0,66
fosfor ogółem	1,40	0,28	0,002	10,5	0,28
wapń	3,60	0,81	0,004	27,0	0,81
magnez	1,10	0,70	0,001	8,3	0,70

Wprowadzenie do gleby obornika, skutkowało stosunkowo wysokim, na tle zastosowanych osadów ściekowych stabilizowanych różnymi metodami, wzrostem materii organicznej – $1,052 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$. Zawartość azotu ogółem, fosforu ogółem, wapnia i magnezu wzrosła niewiele, odpowiednio o $0,025 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, $0,002 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, $0,004 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ i $0,001 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$.

Zastosowane osady ściekowe stabilizowane różnymi metodami charakteryzowały się wyższą, w odniesieniu do obornika, zawartością makroelementów. Przedstawione wyniki są zbieżne ze spostrzeżeniami Siuty [141], Jezierskiej-Tyc i Frąca [64], Kazanowskiej i Szaciło [71] oraz Kitczaka i Czyża [72], którzy podają, że komunalne osady ściekowe zawierają cenne dla rolnictwa składniki pokarmowe i substancje organiczne, a tym samym posiadają wysoką wartość nawozową. Wyższa zawartość makroskładników w osadach ściekowych w odniesieniu do obornika wskazuje na możliwość stosowania ich jako alternatywnego źródła materii organicznej i składników pokarmowych.

4.3 ZAWARTOŚĆ WĘGLA ORGANICZNEGO W GLEBIE

Uzyskane wyniki wskazują, iż najwyższą średnią zawartością węgla organicznego charakteryzowały się próbki gleb pobrane z poletek, na których zastosowano nawożenie obornikiem (kontrola), a najniższą z poletek nawożonych osadem ściekowym komunalnym, fermentowanym i osadem przemysłowym z dodatkiem ługu zielonego (10% obj.). Różnice wynosiły odpowiednio $0,49$ i $0,48 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ i były nieistotne statystycznie (tab. 24).

Tabela 24. Zawartość węgla organicznego w próbkach gleb pobranych w poszczególnych latach badań

Rodzaj osadu	2005 rok	2006 rok	2007 rok	średnia
	Corg (g·kg ⁻¹)			
KF	5,81	6,01	5,81	5,87
KFW	5,83	6,70	6,11	6,21
KFK	5,87	6,54	5,95	6,12
KFŁ	5,65	6,07	6,10	5,94
PP	5,97	5,99	6,09	6,02
PŁ	5,72	5,89	6,03	5,88
K	6,39	6,13	6,55	6,36

NIR_{α0,05} = n.i.

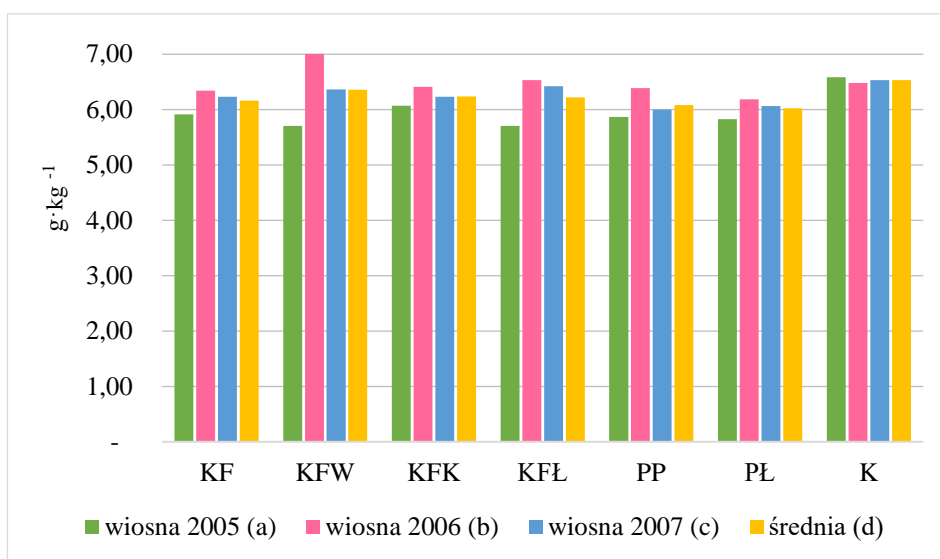
Stwierdzono, że stosowanie, w założonej dawce, osadów ściekowych stabilizowanych różnymi metodami nie wpływało na istotne zmiany średniej zawartości węgla organicznego w glebie. Należy jednak podkreślić, że w drugim i trzecim roku zaobserwowano niewielki wzrost zawartości węgla organicznego.

Średnia zawartość Corg w próbkach gleb pobranych w drugim roku, w odniesieniu do pierwszego roku badań, na poletkach nawożonych osadami ściekowymi była wyższa od 0,02 g·kg⁻¹ (dla wariantu PP) do 0,87 g·kg⁻¹ (dla wariantu KFW). Natomiast w próbkach gleb pobranych w trzecim roku, średnia zawartość węgla organicznego była wyższa od 0,08 g·kg⁻¹ (dla poletek nawożonych osadem fermentowanym, kompostowanym) do 0,45 g·kg⁻¹ (dla poletek nawożonych osadem fermentowanym z dodatkiem ługu zielonego). Zależności takich nie stwierdzono jedynie w przypadku poletka, gdzie stosowano nawożenie osadem ściekowym komunalnym, fermentowanym – w trzecim roku doświadczenia średnia zawartość węgla organicznego utrzymywała się na takim samym poziomie jak w pierwszym roku. Nie stwierdzono jednoznacznych tendencji wzrostu lub spadku średniej zawartości węgla organicznego między drugim, a trzecim rokiem badań.

Wzrost zawartości materii organicznej pod wpływem nawożenia osadami ściekowymi wykazali również Górski i Stępień [52], którzy po 3 latach prowadzenia doświadczenia wazonowego odnotowali wyższą o 7,14% średnią zawartość węgla organicznego po zastosowaniu nawożenia przekompostowanym osadem ściekowym z dodatkiem popiołu w dawce odpowiadającej 170 kg N·ha⁻¹. Morel i Guckert [93] po trzech latach prowadzenia doświadczenia polowego odnotowali wzrost zawartości węgla organicznego o 9,0 i 33,0% w zależności od zastosowanej dawki osadów ściekowych (odpowiednio 70 i 140 Mg s.m.·ha⁻¹ w podzielonych dawkach). Wzrost zawartości materii organicznej, średnio o 1,2 – 1,4% pod wpływem nawożenia osadami ściekowymi zaobserwowali także Marando i in. [88].

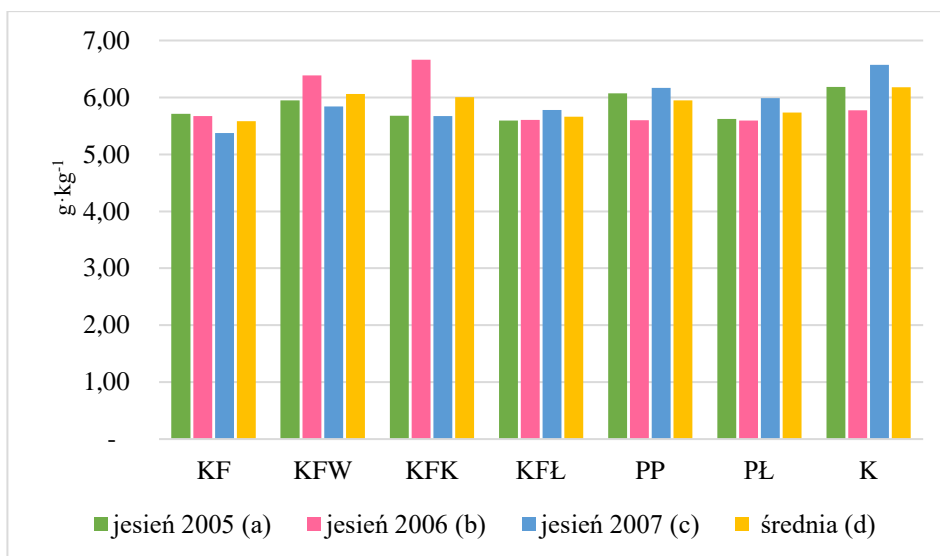
Na podstawie uzyskanych wyników przeprowadzono analizę zmian zawartości węgla organicznego w próbkach gleb pobranych wiosną i jesienią w poszczególnych latach badań. Stwierdzono, że zawartość węgla organicznego

w próbkach gleb pobranych wiosną w drugim (2006) i trzecim (2007) roku była wyższa niż w pierwszym roku badań (rys. 5). Różnice między zawartością węgla w próbkach gleb pobranych w pierwszym i w drugim roku kształtowały się w zakresie od 0,4 do 1,3 g·kg⁻¹, natomiast między pierwszym, a trzecim rokiem badań od 0,1 do 0,7 g·kg⁻¹ (rys. 5), nie były one jednak istotne statystycznie. Należy podkreślić, że w trzecim roku badań w miejscach gdzie zastosowano nawożenie osadami ściekowymi nastąpił spadek zawartości węgla organicznego, niemniej zawartość ta była wyższa niż na początku doświadczenia.



Rys. 5 Średnia zawartość węgla organicznego (g·kg⁻¹) w próbkach gleb pobranych wiosną w 2005, 2006 i 2007 roku. NIR_{a,b,c,d}=n.i.

Opisywanych wyżej zależności nie stwierdzono między próbkami gleb pobranymi jesienią (rys. 6). W drugim roku badań wyższą zawartością węgla organicznego, w porównaniu do pierwszego roku, charakteryzowały się próbki pobrane z obiektów nawożonych komunalnymi, fermentowanymi, wapnowanymi osadami ściekowymi i komunalnymi, fermentowanymi, kompostowanymi osadami ściekowymi. W pozostałych obiektach odnotowano niższą zawartość związków węgla (rys. 6). W trzecim roku badań stwierdzono odwrotną zależność niż w drugim roku – wyższą zawartością węgla organicznego cechowały się gleby pobrane z obiektów KFŁ, PP, PŁ oraz obiekt kontrolny. Różnice te były jednak nieistotne statystycznie.

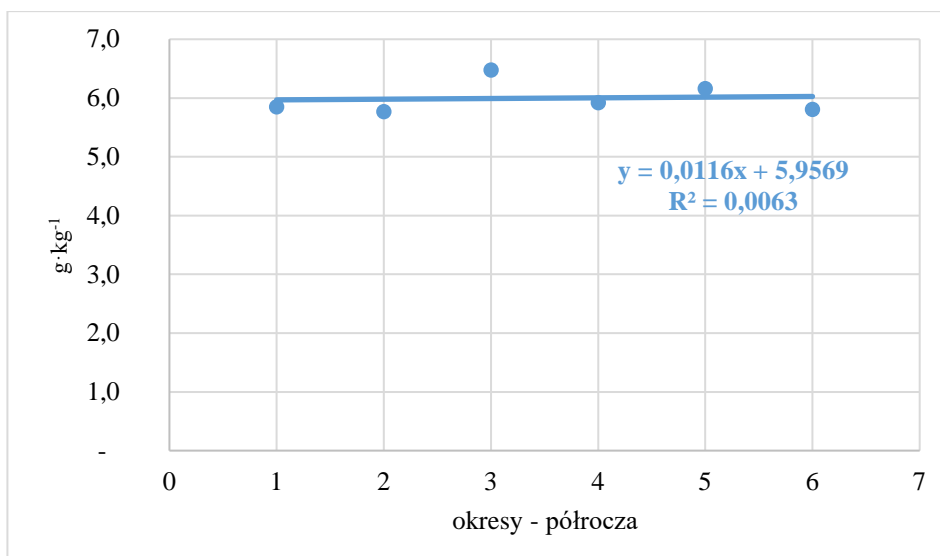


Rys. 6. Średnia zawartość węgla organicznego ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) w próbkach gleb pobranych jesienią w 2005, 2006 i 2007 roku. $\text{NIR}_{a,b,c,d}=\text{n.i.}$

Należy podkreślić, że brak istotności statystycznej uzyskanych różnic między średnią zawartością węgla organicznego w próbkach gleb pobranych z obiektów kontrolnych (nawożonych obornikiem), a poletek gdzie stosowano osady ściekowe stabilizowane różnymi metodami wskazuje na możliwość stosowania wybranych osadów jako substytutu obornika.

W celu określenia zmian średniej zawartości węgla organicznego w czasie w obiektach nawożonych osadami ściekowymi stabilizowanymi różnymi metodami przeprowadzono również analizę regresji prostej (rys. 7) oraz określono współczynnik determinacji (R^2).

Na podstawie wyznaczonego równania regresji liniowej stwierdzono, że nawożenie gleb osadami ściekowymi o różnych metodach stabilizacji połączone z prowadzeniem uprawy kukurydzy na tych obiektach wiązało się z niewielkim wzrostem średniej zawartości węgla organicznego. Wyznaczona funkcja liniowa charakteryzowała się dodatnią wartością współczynnika kierunkowego (0,0116).



Rys. 7. Zmiany średniej zawartości węgla organicznego (Corg) w glebie nawożonej osadami ściekowymi stabilizowanymi różnymi metodami

Brak wahań lub ubytków zawartości węgla w glebie może wskazywać na brak degradacji materii organicznej wyrażonej jego zawartością, a co za tym idzie, że rolnicze stosowanie osadów ściekowych może stanowić element prowadzenia zrównoważonej uprawy kukurydzy.

4.4 ZAWARTOŚĆ AZOTU OGÓŁEM W GLEBIE

Niezależnie od rodzaju zastosowanego nawożenia organicznego średnia zawartość azotu ogółem nie zmieniała się istotnie w czasie trwania doświadczenia. Średnio najwyższą zawartość azotu ogółem odnotowano w próbkach gleb pobranych z poletek nawożonych obornikiem, osadem komunalnym, fermentowanym, wapnowanym i osadem przemysłowym z dodatkiem popiołu (10% obj.), a najniższą z poletek gdzie stosowano nawożenie osadem ściekowym komunalnym, fermentowanym. Różnice wynosiły odpowiednio 0,05 g·kg⁻¹ (tab. 25) i były nieistotne statystycznie.

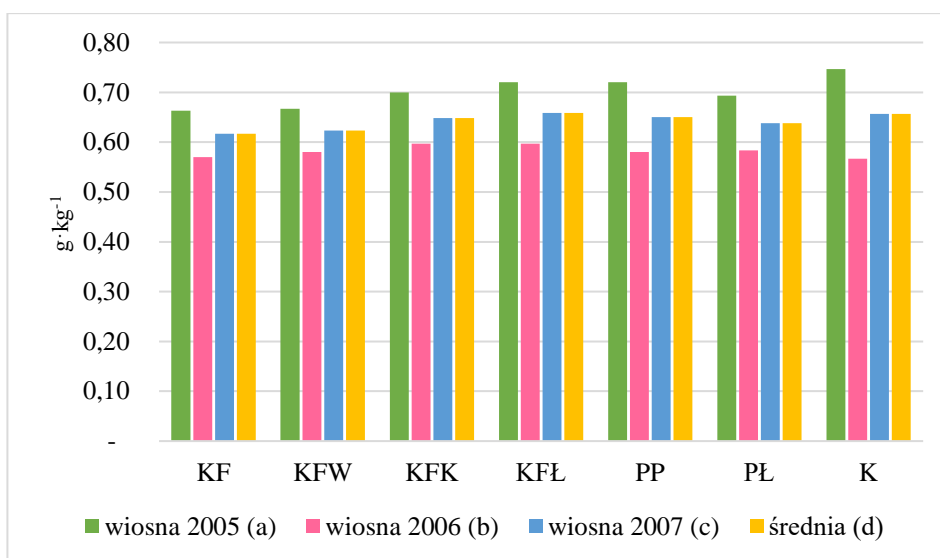
Tabela 25. Zawartość azotu ogółem w próbkach gleb pobranych w poszczególnych latach badań

Rodzaj osadu	2005 rok	2006 rok	2007 rok	średnia
	Nt (g·kg ⁻¹)			
KF	0,64	0,55	0,59	0,59
KFW	0,65	0,63	0,63	0,64
KFK	0,66	0,61	0,63	0,63
KFŁ	0,67	0,58	0,64	0,63
PP	0,67	0,59	0,65	0,64
PŁ	0,65	0,59	0,65	0,63
K	0,70	0,59	0,64	0,64

NIR $\alpha_{0,05}$ = n.i.

W przeciwieństwie do wyników badań uzyskanych przez Górską i Stępnia [52], którzy w przeprowadzonym doświadczeniu wazonowym zaobserwowali wzrost średniej zawartości azotu ogółem (o 15,7%) pod wpływem zastosowanego nawożenia przekompostowanym osadem ściekowym z dodatkiem popiołu – w przeprowadzonych badaniach nie stwierdzono takich zależności. Zaobserwowano natomiast, że średnia zawartość azotu ogółem w trzecim roku badań była niższa niż w pierwszym roku o 3,2% dla wariantu KFW, o 8,5% dla wariantu KF oraz 8,6% dla wariantu kontrolnego. Zależności takiej nie stwierdzono jedynie dla wariantu PŁ, gdzie odnotowano taką samą średnią zawartość azotu ogółem w pierwszym i trzecim roku doświadczenia (tab. 25). Brak istotnych zmian oraz niewielkie różnice średniej zawartości azotu ogółem wskazują na stosunkowo równomierne przyswajanie i straty tego składnika na wszystkich badanych poletkach.

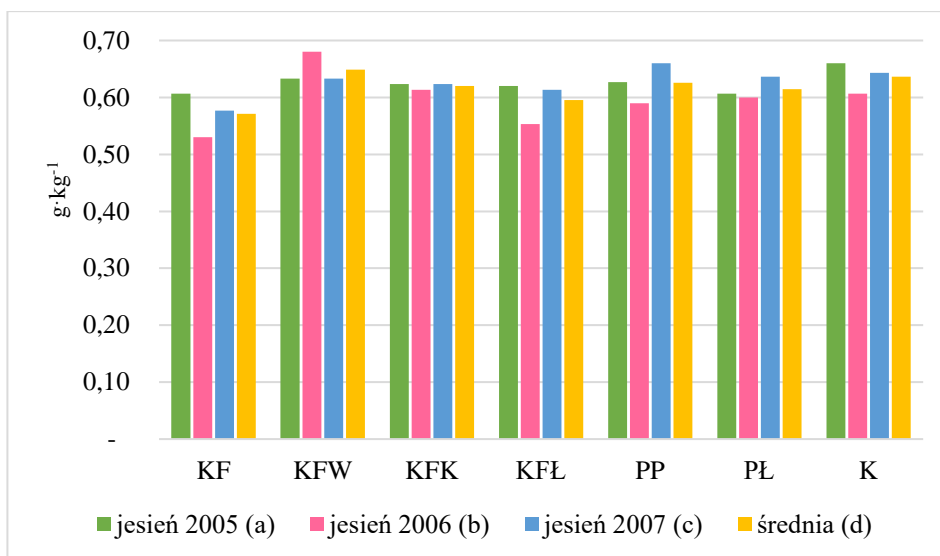
Różnice zawartości azotu ogółem w próbkach gleb pobranych w poszczególnych latach badań, w terminach wiosennych, również nie były istotne statystycznie (rys. 8). Najniższą średnią zawartością azotu ogółem charakteryzowały się próbki wariantów KF i KFW, a najwyższą wariantu KFŁ i obiektu kontrolnego, gdzie różnice osiągały jednakową wartość 0,04 g·kg⁻¹. Należy zaznaczyć, że we wszystkich badanych obiektach zaobserwowano taką samą tendencję spadku zawartości azotu w drugim roku, a następnie wzrostu w trzecim roku doświadczenia (rys. 8).



Rys. 8. Średnie zawartości azotu ogółem ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) w próbkach gleb pobranych wiosną w 2005, 2006 i 2007 roku. $\text{NIR}_a=\text{n.i.}$, $\text{NIR}_b=\text{n.i.}$, $\text{NIR}_c=\text{n.i.}$, $\text{NIR}_d=0,05$.

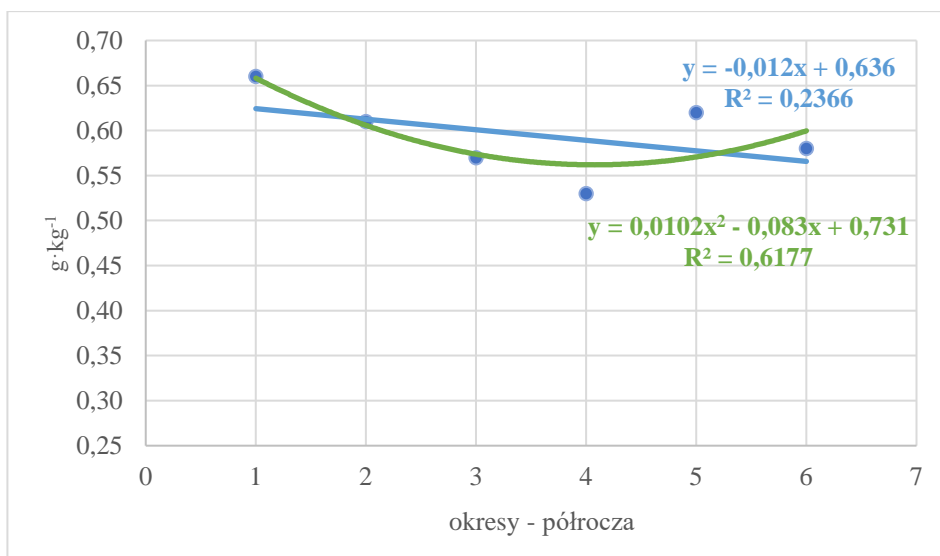
Mimo braku istotnych różnic między średnią zawartością azotu ogółem między poszczególnymi latami badań oraz między próbkami pobranymi w terminach wiosennych, stwierdzono występowanie istotnych różnic między średnią zawartością azotu ogółem w próbkach gleb pobieranych jesienią (rys. 9). Zaobserwowano, że średnia zawartość azotu ogółem różniła się istotnie między próbkami pobranymi z poletek nawożonych osadem ściekowym komunalnym fermentowanym, a osadem ściekowym komunalnym, fermentowanym, wapnowanym – różnica wynosiła $0,08 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$. Zróznicowanie średniej zawartości azotu ogółem między próbkami pobranymi z tych obiektów mogło być spowodowane niejednakowym tempem uwalniania składników pokarmowych na skutek zachodzącego w okresie jesiennym procesu mineralizacji.

Analizując zmiany zawartości azotu ogółem stwierdzono, że w próbkach gleb pobranych wiosną (rys. 8) z poletek nawożonych osadami ściekowymi średnia zawartość azotu ogółem była wyższa niż w próbkach gleb pobranych jesienią (rys. 9), średnio o 3,7% (dla wariantu PP) i o 10,6% (dla wariantu KFŁ). Zróznicowanie to należy tłumaczyć wzrostem zawartości tego składnika pod wpływem zastosowanego wiosennego mineralnego nawożenia azotowego.

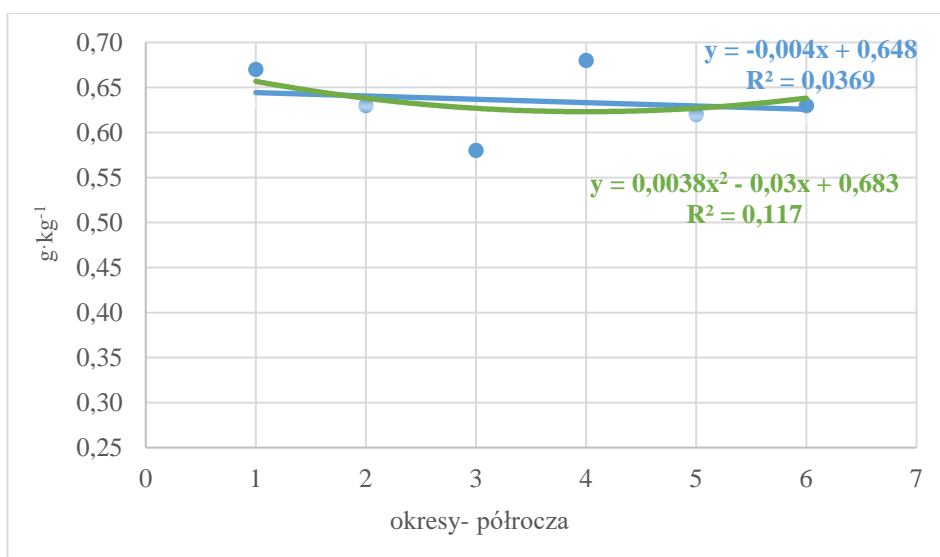


Rys. 9. Średnia zawartość azotu ogółem ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$) w próbkach gleb pobranych jesienią w 2005, 2006 i 2007 roku. $\text{NIR}_a = \text{n.i.}$, $\text{NIR}_b = \text{n.i.}$, $\text{NIR}_c = \text{n.i.}$, $\text{NIR}_d = 0,07$.

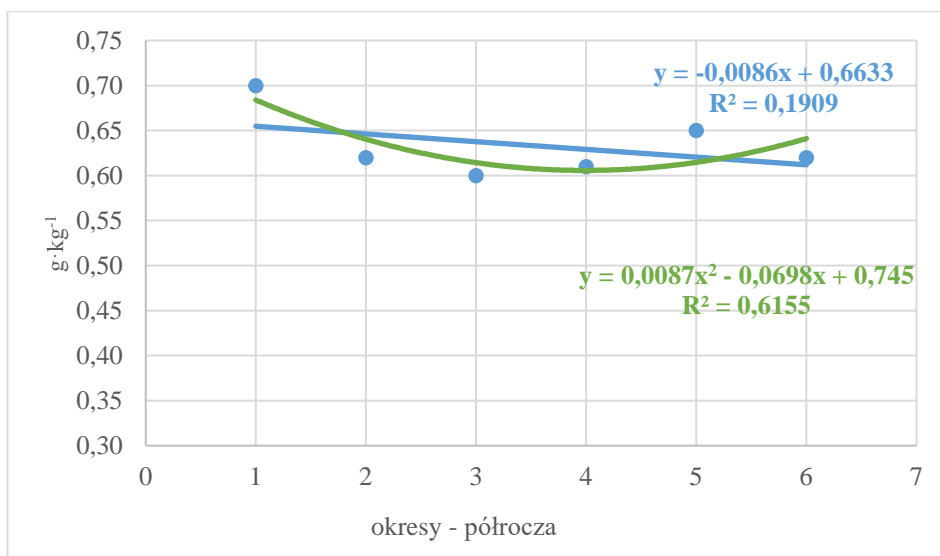
W celu określenia zmian zawartości azotu ogółem w czasie przeprowadzono także analizę regresji liniowej i wielomianowej (rys. 10-16). Na wykresach przedstawiono równania regresji (liniowej i wielomianowej) oraz współczynniki determinacji R^2 . Równania wielomianowe zostały przedstawione ze względu na najwyższe wartości współczynnika R^2 wskazującego na dopasowanie równania do zakresu danych punktowych. W związku z tym, że równania logarytmiczne, potęgowe i wykładnicze charakteryzowały się niższymi współczynnikami R^2 nie przedstawiono ich na wykresach (rys. 10-16). Obok wykresów wielomianów przedstawiono także wykresy liniowe, które charakteryzowały się mniejszymi wartościami współczynników R^2 , natomiast wykresy te oraz opisujące je równania pozwalają na określenie prognozy zmian zawartości azotu w glebie podczas prowadzenia upraw kukurydzy na polach nawiezionych osadami ściekowymi i obornikiem.



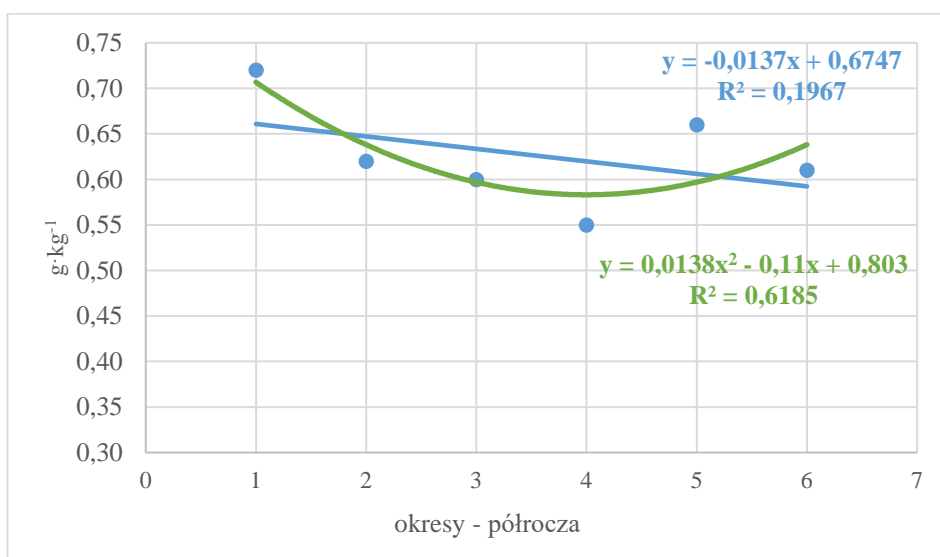
Rys. 10. Zmiany zawartości azotu ogółem w latach 2005-2007 w glebie nawożonej osadem ściekowym komunalnym, fermentowanym (KF)



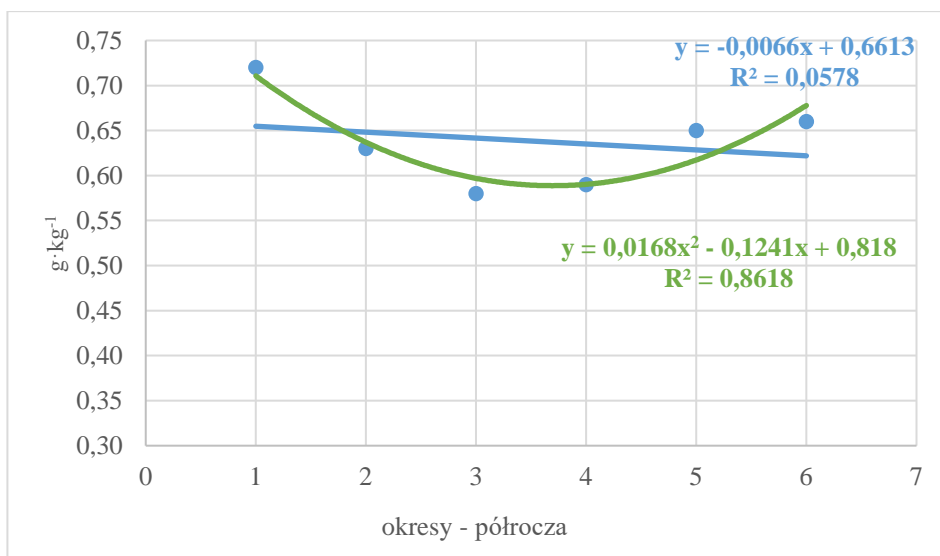
Rys. 11. Zmiany zawartości azotu ogółem w latach 2005-2007 w glebie nawożonej osadem ściekowym komunalnym, fermentowanym, wapnowanym (KFW)



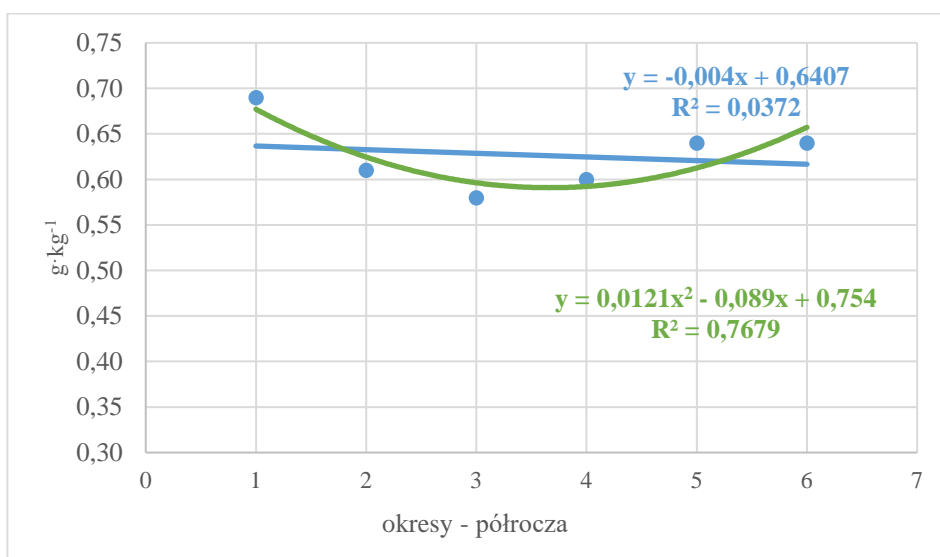
Rys. 12. Zmiany zawartości azotu ogółem w latach 2005-2007 w glebie nawożonej osadem ściekowym komunalnym, fermentowanym, kompostowanym (KFK)



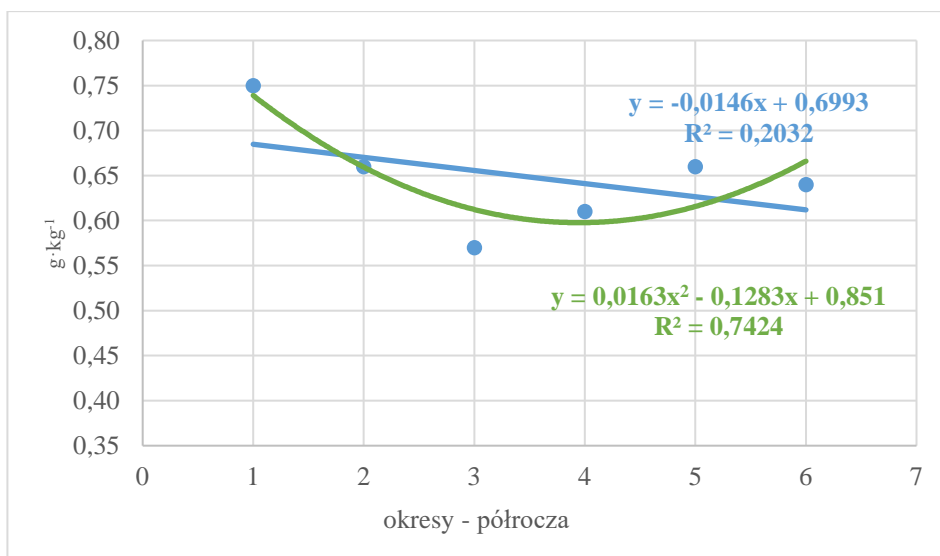
Rys. 13. Zmiany zawartości azotu ogółem w latach 2005-2007 w glebie nawożonej osadem ściekowym komunalnym, fermentowanym z dodatkiem ługu zielonego (KFL)



Rys. 14. Zmiany zawartości azotu ogółem w latach 2005-2007 w glebie nawożonej osadem ściekowym przemysłowym z dodatkiem popiołu (PP)



Rys. 15. Zmiany zawartości azotu ogółem w latach 2005-2007 w glebie nawożonej osadem ściekowym przemysłowym z ługu zielonego (PŁ)



Rys. 16. Zmiany zawartości azotu ogółem w latach 2005-2007 w glebie nawożonej obornikiem – obiekt kontrolny (K)

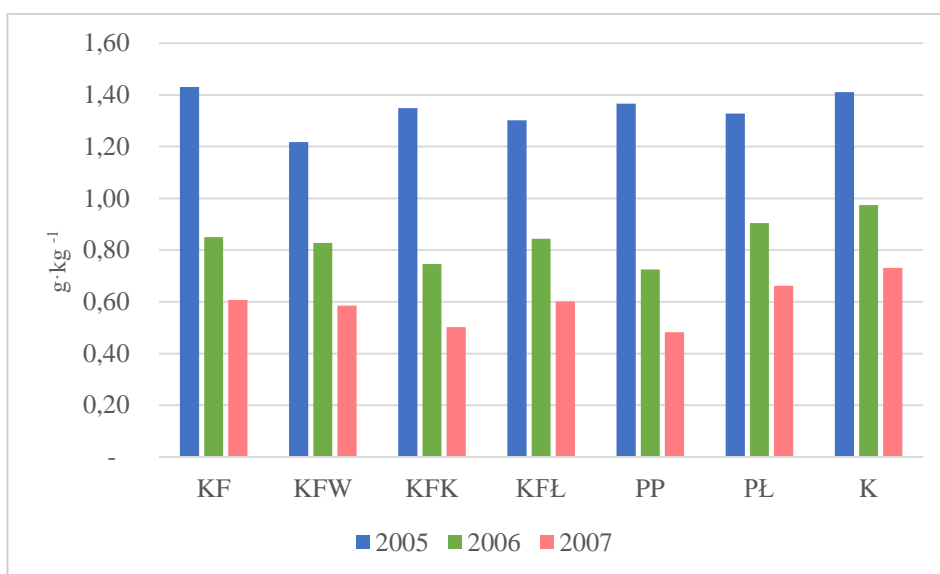
Niezależnie od zastosowanej formy nawożenia osadami ściekowymi na wszystkich obiektach badawczych zanotowano malejący trend zawartości azotu w glebie w funkcji upływającego czasu trwania doświadczenia (rys. 10-16). Wszystkie wyznaczone funkcje liniowe (rys. 10-16) charakteryzowały się ujemnymi wartościami współczynników kierunkowych prostych, które mieściły się w przedziale od -0,004 do -0,0146.

Wyznaczone równania pozwalają stwierdzić, że prowadzenie uprawy kukurydzy związane było ze stopniowym obniżaniem zawartości azotu w glebie, który wynoszony był głównie z plonami. Teoretyczna prognoza oparta na równaniach liniowych wskazuje, że w przypadku braku zasilania gleby w azot jego ubytek do zerowej wartości nastąpił by w ciągu 80,1 lat w przypadku uprawy kukurydzy po zastosowaniu osadu komunalnego, fermentowanego, wapnowanego oraz osadu przemysłowego z dodatkiem ługu zielonego (rys. 11 i 15 – najwyższy współczynnik kierunkowy prostej -0,004) lub po upływie 23,3 lat w przypadku uprawy opartej o nawiezenie pola obornikiem (rys. 16 – najniższy współczynnik kierunkowy prostej -0,0146).

Wskazać należy, że równania wielomianowe (kwadratowe) określające zależność dotyczącą zawartości azotu w glebie w funkcji czasu, pomimo wysokich współczynników R^2 , nie nadają się do prognozowania opisywanej zależności, gdyż wykreślone odcinki parabol charakteryzują się występowaniem ekstremum w postaci minimum funkcji, które w każdym przypadku jest wartością większą od 0, zatem równanie wielomianowe w przedmiotowym przypadku sugerowałoby, że nie jest możliwy spadek zawartości azotu poniżej danej wartości odpowiadającej ekstremum funkcji.

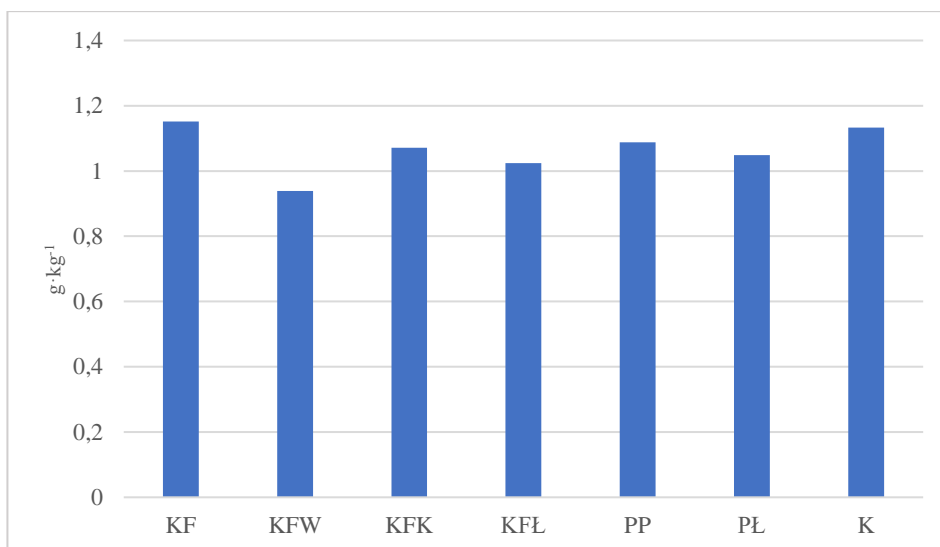
4.5 ZAWARTOŚĆ FOSFORU W GLEBIE

Uzyskane wyniki wskazują, iż najwyższą średnią zawartością fosforu charakteryzowały się próbki gleb pobrane z poletek, gdzie zastosowano nawożenie obornikiem, a najniższą z poletek nawożonych osadem przemysłowym z dodatkiem popiołu oraz osadem komunalnym fermentowanym kompostowanym, różnice wynosiły odpowiednio 0,18 i 0,17 g·kg⁻¹ i były istotne statystycznie (rys. 17), pozostałe różnice okazały się nieistotne.



Rys. 17. Zmiany zawartości fosforu ogółem próbkach gleb pobranych w poszczególnych latach badań po zastosowaniu nawożenia osadami ściekowymi, $NIR\alpha_{0,05} = 0,17$

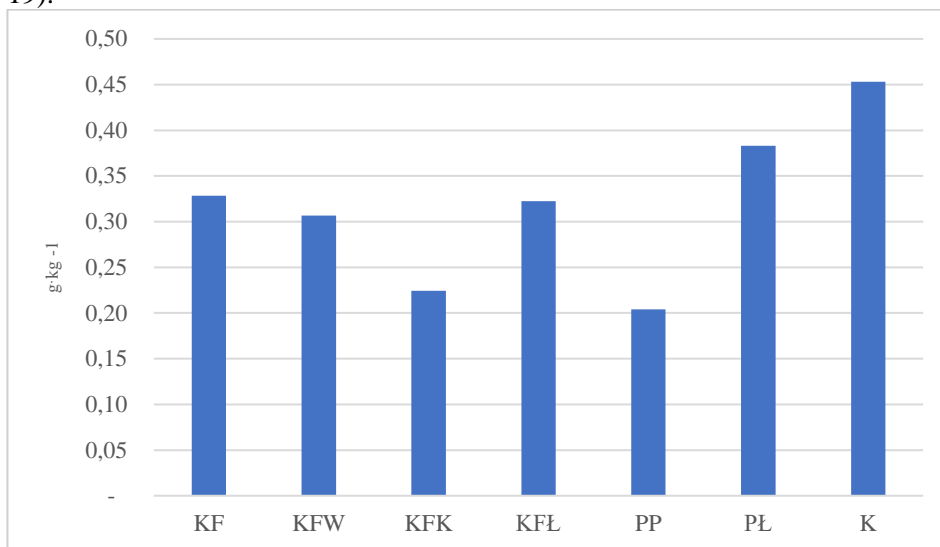
Należy podkreślić, że średnia zawartość fosforu w próbkach gleb przed zastosowaniem nawożenia osadami ściekowymi wynosiła 0,28 g·kg⁻¹ (tab.1) natomiast bezpośrednio po zastosowaniu nawożenia osadami ściekowymi była wyższa od 0,94 g·kg⁻¹ (dla wariantu KFW) do 1,15 g·kg⁻¹ (dla wariantu KF; rys. 18). Wyniki te są zbieżne ze spostrzeżeniami Siebelca i Stuczyńskiego [140] oraz Wołejko i Wydro [162], którzy podają, że wprowadzenie do gleby osadów ściekowych powoduje wzrost zawartości tego pierwiastka od kilkudziesięciu do kilkuset procent. A także z wynikami badań Vaca i in. [156], który zaobserwowali istotny wzrost zawartości fosforu w glebie, na której stosowano nawożenie osadami ściekowymi oraz kompostem na bazie osadów ściekowych odpowiednio o 35,4 i 42,4%, w porównaniu do gleby nienawożonej. Wzrost zawartości fosforu ogółem w glebie bezpośrednio po wprowadzeniu osadów ściekowych przedstawiono na rys. 18.



Rys. 18. Wzrost zawartości fosforu ogółem w glebie po zastosowaniu nawożenia osadami ściekowymi stabilizowanymi różnymi metodami i obornikiem

W drugim roku badań, w odniesieniu do pierwszego roku, zawartość fosforu była niższa od 0,39 (wariant KFW) do 0,64 g·kg⁻¹ (wariant PP). W trzecim roku zawartość omawianego pierwiastka, w porównaniu do zawartości bezpośrednio po wprowadzeniu osadów ściekowych, była niższa od 0,63 do 0,88 g·kg⁻¹.

Stwierdzono, że mimo spadku zawartości fosforu w trzecim roku, zawartość ta była wyższa niż przed zastosowaniem nawożenia osadami ściekowymi (rys. 19).



Rys. 19. Różnica zawartości fosforu ogółem w próbkach gleb pobranych przed zastosowaniem nawożenia osadami ściekowymi i po zakończeniu doświadczenia

Obniżenie zawartości fosforu w drugim i trzecim roku, mimo zastosowanego nawożenia mineralnego, było najprawdopodobniej spowodowane pobieraniem tego pierwiastka przez rośliny. Spostrzeżenia te są zgodne z wynikami badań uzyskanymi przez Mazura i Mokrą [89], którzy podają że wprowadzony do gleby wraz z osadami ściekowymi fosfor odgrywa bardzo ważną rolę w zaopatrzeniu roślin w następnych latach. Uzyskane wyniki wskazują, iż osady ściekowe poddane różnym metodom stabilizacji pełnią ważną rolę w zaopatrzeniu roślin w fosfor i mogą być traktowane jako pełnowartościowy, bogaty w makroelementy nawóz organiczny [123, 124].

4.6 ODCZYN GLEBY

Analiza pH wykonana w wodzie destylowanej wskazuje, że badana gleba w pierwszym roku doświadczenia po zastosowaniu nawożenia osadami ściekowymi stabilizowanymi różnymi metodami charakteryzowała się odczynem kwaśnym, lekko kwaśnym i obojętnym, natomiast w trzecim roku odczynem lekko kwaśnym i obojętnym (tab. 26) [91].

Tabela 26. Odczyn gleby na poletkach doświadczalnych po zastosowaniu nawożenia osadem ściekowym

Rodzaj osadu	2005		2006		2007	
	pH	Me	pH	Me	pH	Me
KF	6,2-6,3	6,2	6,3-6,7	6,5	6,9-7,3	7,3
KFW	6,1-6,3	6,2	6,2-6,6	6,4	6,5-7,3	7,2
KFK	5,7-6,3	6,3	6,4-6,8	6,5	7,2-7,3	7,3
KFŁ	6,0-6,3	6,1	6,5-6,8	6,5	7,2-7,4	7,3
PP	5,6-6,4	6,3	6,6-6,6	6,6	7,2-7,4	7,3
PŁ	6,0-6,3	6,2	6,3-6,5	6,5	7,2-7,4	7,3
K	5,9-6,8	6,1	6,5-6,7	6,6	7,2-7,3	7,3

* Me - mediana

Niezależnie od rodzaju zastosowanego osadu ściekowego wartość pH w trzecim roku doświadczenia była wyższa średnio o 1,0 – 1,2 jednostki w odniesieniu do próbek pobranych w pierwszym roku po zastosowaniu nawożenia. Podobną zależność stwierdzono dla wariantu, gdzie stosowano obornik.

Górska i Stępień [52] na podstawie przeprowadzonego doświadczenia wazonowego również stwierdzili wzrost wartości pH_{KCl} z 6,9 do 7,5 po trzech latach od zastosowanego nawożenia osadem ściekowym. Podobne wyniki badań uzyskali także Filipiak i in. [37], którzy zaobserwowali zmianę odczynu gleb z kwaśnego i lekko kwaśnego na zasadowy oraz Fijałkowski i Kacprzak [35],

którzy odnotowali korzystną zmianę odczynu po zastosowaniu nawożenia osadem ściekowym (z pH=5 na pH=6,66 i 6,76).

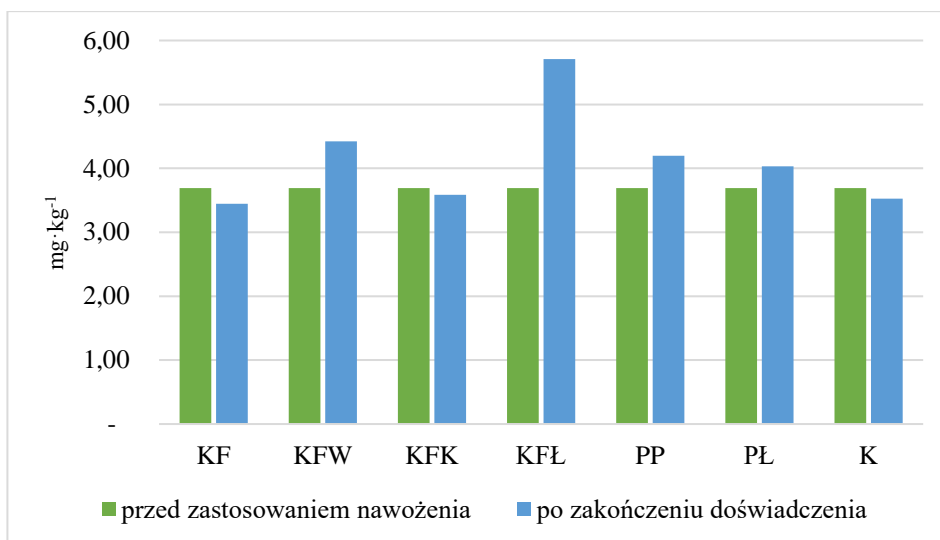
Uzyskane wyniki badań wskazują, że nawożenie osadami ściekowymi stabilizowanymi różnymi metodami, podobnie jak nawożenie obornikiem, wywiera pozytywny wpływ na odczyn gleb.

4.7 WPLYW NAWOŻENIA OSADAMI ŚCIEKOWYMI NA ZAWARTOŚĆ METALI CIĘŻKICH W GLEBIE

Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że pod wpływem zastosowanego nawożenia organicznego zawartość metali ciężkich zmieniała się, przy czym kierunek tych zmian był determinowany rodzajem zastosowanych osadów ściekowych. Należy zaznaczyć, że zawartość metali ciężkich w zastosowanych osadach ściekowych była niższa, niż zawartości dopuszczalne określone w rozporządzeniu Ministra Środowiska z dnia 1 sierpnia 2002 roku w sprawie komunalnych osadów ściekowych [127], a także obecnie obowiązującego rozporządzenia Ministra Środowiska z dnia 6 lutego 2015 roku w sprawie komunalnych osadów ściekowych [132].

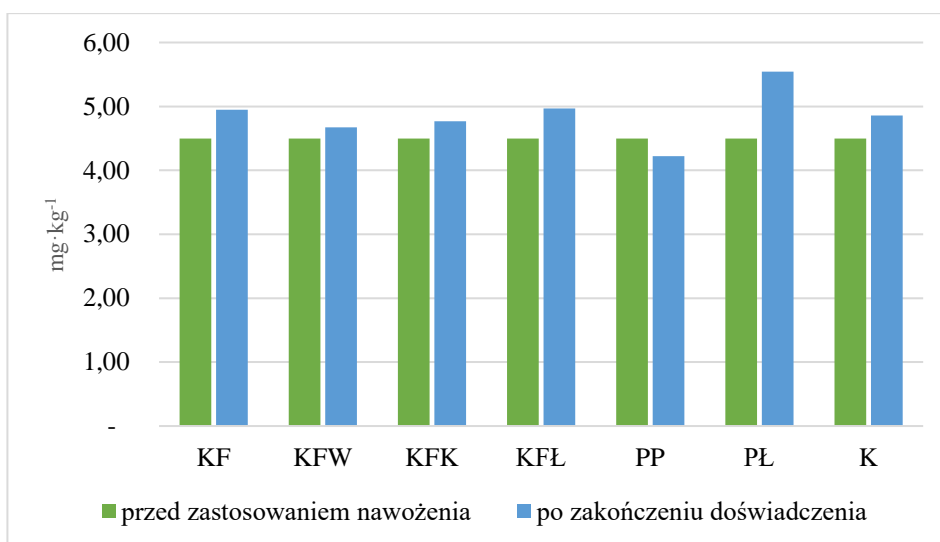
Zawartość analizowanych metali ciężkich w glebie przed zastosowaniem nawożenia osadami ściekowymi nie przekraczała dopuszczalnych zawartości określonych w rozporządzeniu Ministra Środowiska z dnia 9 września 2002 r. w sprawie standardów jakości gleby oraz standardów jakości ziemi [134] oraz w obecnie obowiązującym rozporządzeniu Ministra Środowiska z dnia 1 września 2016 r. w sprawie sposobu prowadzenia oceny zanieczyszczenia powierzchni ziemi [128]. Zgodnie z ww. rozporządzeniami gleba ta została zaklasyfikowana do grupy B – grunty zaliczane do użytków rolnych [134] oraz do grupy II – grunty orne [128].

Średnia zawartość niklu w glebie przed zastosowaniem nawożenia organicznego wynosiła $3,69 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ s.m. W obiektach gdzie stosowano nawożenie osadem ściekowym komunalnym, fermentowanym, osadem ściekowym komunalnym, fermentowanym, kompostowanym oraz w obiekcie kontrolnym zawartość niklu po zakończeniu doświadczenia była mniejsza od 3,0 do 7,3%. Natomiast w pozostałych obiektach (KFW, KFL, PP, PŁ) wzrosła od 8,4 do 35,3% (rys. 20).



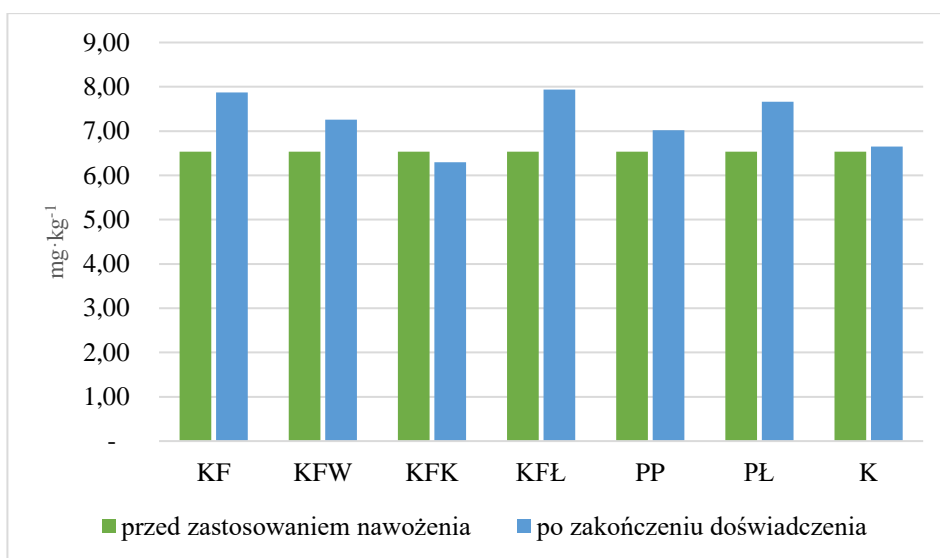
Rys. 20. Średnia zawartość niklu ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ s.m.) w próbkach gleb pobranych z obiektów badawczych przed zastosowaniem nawożenia oraz po zakończeniu doświadczenia

Średnia zawartość chromu w glebie przed zastosowaniem nawożenia osadami ściekowymi wynosiła $4,50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ s.m. Stwierdzono, że po zakończeniu doświadczenia średnia zawartość tego pierwiastka zmniejszyła się o 6,5% w próbkach gleb pobranych z poletek gdzie stosowano nawożenie osadem ściekowym przemysłowym z dodatkiem popiołu (rys. 21). W pozostałych obiektach średnia zawartość chromu wzrosła, przy czym najwyższy wzrost (18,9%) odnotowano w próbkach gleb pobranych z poletek, na których zastosowano nawożenie osadem przemysłowym z dodatkiem ługu zielonego – średnia zawartość chromu w obiekcie PŁ po zakończeniu doświadczenia wynosiła $5,54 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ s.m..



Rys. 21. Średnia zawartość chromu ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ s.m.) w próbkach gleb pobranych z obiektów badawczych przed zastosowaniem nawożenia oraz po zakończeniu doświadczenia

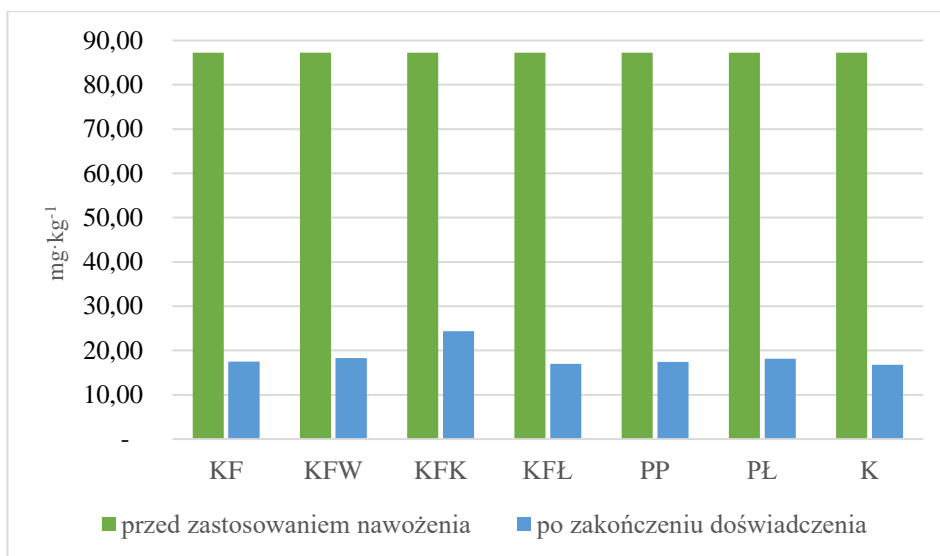
Średnia zawartość ołowiu w glebie przed zastosowaniem nawożenia osadami ściekowymi wynosiła $6,53 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ s.m.. W większości badanych obiektów (rys. 22) zawartość ołowiu po zakończeniu doświadczenia była wyższa niż przed zastosowaniem osadów ściekowych. Wyjątek stanowi obiekt, na którym zastosowano nawożenie osadem komunalnym, fermentowanym kompostowanym, gdzie odnotowano niższą średnią zawartość (o 3,8%). Najwyższy wzrost zawartości analizowanego pierwiastka (o 17,6%) stwierdzono w obiekcie nawożonym osadem komunalnym, fermentowanym, ługowanym – średnia zawartość ołowiu wynosiła $7,93 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ s.m..



Rys. 22. Średnia zawartość ołowiu ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ s.m.) w próbkach gleb pobranych z obiektów badawczych przed zastosowaniem nawożenia oraz po zakończeniu doświadczenia

Średnia zawartość cynku w glebie przed zastosowaniem nawożenia organicznego wynosiła $87,25 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ s.m. (rys. 18). Natomiast po zakończeniu doświadczenia była niższa średnio o ok. 3,6 razy w obiekcie nawożonym osadem komunalnym fermentowanym, kompostowanym oraz ok. 5,1 razy w obiekcie, gdzie zastosowano osad ściekowy komunalny, fermentowany, ługowany i o ok. 5,2 razy w obiekcie kontrolnym (rys. 23).

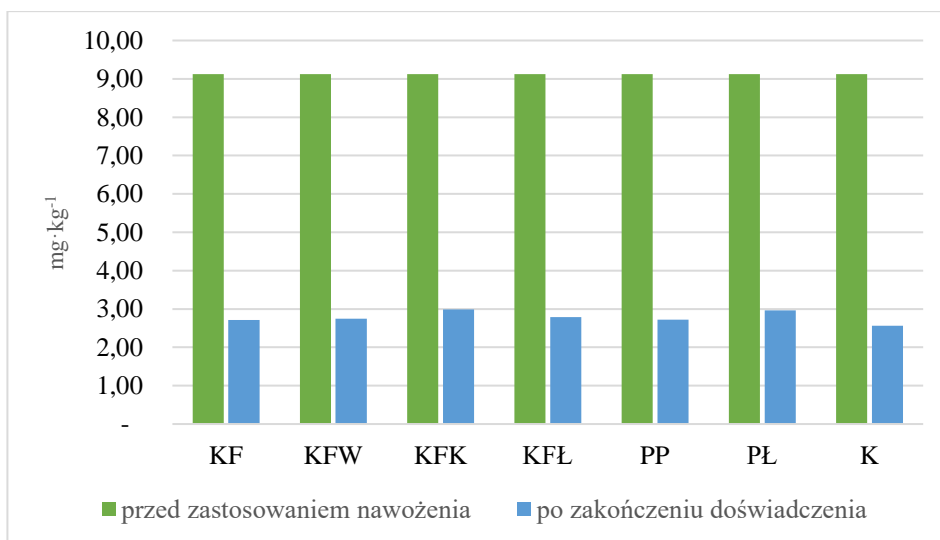
Należy zaznaczyć, że cynk zaliczany jest do grupy mikroelementów, a kukurydza jest rośliną wrażliwą na niedobór tego składnika [50]. Znaczący spadek zawartości tego mikroelementu, we wszystkich badanych obiektach świadczy więc o stosunkowo silnym pobieraniu przez rośliny i wynoszeniu z plonem.



Rys. 23. Średnia zawartości cynku ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ s.m.) w próbkach gleb pobranych z obiektów badawczych przed zastosowaniem nawożenia oraz po zakończeniu doświadczenia

Podobnie jak w przypadku zmian zawartości cynku, zaobserwowano również spadek zawartości miedzi (rys. 24). W próbkach gleb pobranych przed zastosowaniem osadów ściekowych średnia zawartość miedzi w glebie wynosiła $9,10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ s.m., natomiast w próbkach gleb pobranych po zakończeniu doświadczenia była od ok. 3,1 do ok. 3,6 razy niższa. Miedź, podobnie jak cynk, zaliczana jest do grupy mikroelementów, dlatego tak znaczne obniżenie mogło być związane z pobieraniem tego składnika przez rośliny.

Wskazuje się, że ilość cynku i miedzi wnoszonej z osadami ściekowymi jest ograniczona, ze względu na klasyfikację tych pierwiastków jako metali ciężkich [127, obecnie 132]. Ich zawartość nie ogranicza natomiast możliwości stosowania kompostów [152]. W celu uzupełnienia zawartości cynku i miedzi w glebie, uzasadnione jest stosowanie kompostów na bazie komunalnych osadów ściekowych w wyższych dawkach, niż zastosowane w przeprowadzonych badaniach dawki osadów ściekowych stabilizowanych różnymi metodami.



Rys. 24. Średnia zawartość miedzi ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ s.m. gleby) w próbkach gleb pobranych z obiektów badawczych przed zastosowaniem nawożenia oraz po zakończeniu doświadczenia

Zawartość kadmu i rtęci w glebie przed zastosowaniem nawożenia osadami ściekowymi wynosiła odpowiednio: $0,18$ i $0,02$ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. Natomiast w próbkach gleb pobranych po zakończeniu doświadczenia była niższa niż wartości referencyjne, dlatego nie analizowano zmian zawartości tych pierwiastków.

Na podstawie przeprowadzonej analizy zmian zawartości metali ciężkich w glebie nawożonej osadami ściekowymi stabilizowanymi różnymi metodami nie stwierdzono jednoznacznych zależności spadku lub wzrostu zawartości tych pierwiastków.

Mimo braku wyraźnych tendencji zmian zawartości metali ciężkich w większości badanych obiektów zaobserwowano wzrost zawartości niklu, chromu i ołowiu, co jest zbieżne z wynikami uzyskanymi przez Bosa i Bhattacharyya [19], którzy również zaobserwowali wzrost zawartości metali ciężkich (m.in. Cr, Mn, Ni i Pb) w glebie nawożonej osadami ściekowymi. Cytowani autorzy stwierdzili, że mimo wzrostu zawartości badanych pierwiastków mieściła się ona w dopuszczalnym zakresie (wg wytycznych USEPA). Również Ociepa [101] wykazała, że w glebach nawożonych osadami ściekowymi wzrosła zawartość niklu i cynku, jednak wzrost ten był niewielki i nie wpłynął na zmianę stopnia zanieczyszczenia gleby (zgodnie ze skalą IUNG). Należy zaznaczyć, że w przeprowadzonych badaniach zmiany zawartości metali ciężkich w glebie nawożonej osadami ściekowymi stabilizowanymi różnymi metodami były niewielkie i nie wpłynęły na zmianę grupy gleby określonej w rozporządzeniu Ministra Środowiska z dnia 9 września 2002 r. w sprawie

standardów jakości gleby oraz standardów jakości ziemi [134] oraz w obecnie obowiązującym rozporządzeniu Ministra Środowiska z dnia 1 września 2016 r. w sprawie sposobu prowadzenia oceny zanieczyszczenia powierzchni ziemi [128].

4.8 WPLYW STOSOWANIA OSADÓW ŚCIEKOWYCH NA WIELKOŚĆ PŁONU ZIARNA KUKURYDZY

Uzyskane w przeprowadzonym doświadczeniu średnie wielkości plonów ziarna kukurydzy w poszczególnych latach badań były zbliżone lub wyższe niż średnie krajowe plony ziarna kukurydzy, które wynosiły w 2005 r. – 5,73 Mg·ha⁻¹, w 2006 r. – 4,16 Mg·ha⁻¹ i w 2007 r. – 6,57 Mg·ha⁻¹ [121].

W pierwszym roku badań najwyższym średnim plonem ziarna kukurydzy charakteryzowały się obiekty na których zastosowano nawożenie osadem ściekowym komunalnym, fermentowanym a najniższym na poletkach gdzie stosowano nawożenie osadem ściekowym przemysłowym z dodatkiem popiołu (10% obj.). Różnica wynosiła 1,54 Mg·kg⁻¹ i była istotna statystycznie. Pozostałe wielkości plonu były nieistotne statystycznie (tab. 27). Stwierdzono, że obiekty które były nawożone osadami ściekowymi pochodzenia komunalnego (wariant KF, KFW, KFK i KFŁ) charakteryzowały się wyższym średnim plonem niż obiekty nawożone osadami pochodzenia przemysłowego (wariant PP i PŁ). Uzyskane wyniki są częściowo zbieżne z wynikami uzyskanymi przez Lekana i Winiarską [83], którzy na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzili, że stosowanie komunalnych osadów ściekowych wpływa istotnie na zwiększenie plonu, natomiast osadów przemysłowych oddziałuje hamująco na przyrost biomasy. W przeprowadzonych badaniach nie stwierdzono natomiast hamującego wpływu osadów ściekowych pochodzenia przemysłowego na zmiany wielkości plonu kukurydzy (tab. 27).

W drugim roku badań nie stwierdzono istotnych różnic między plonem ziarna kukurydzy zebranych z poletek nawożonych osadami ściekowymi stabilizowanymi różnymi metodami. Średnio najwyższy plon ziarna kukurydzy otrzymano z poletka nawożonego osadem ściekowym przemysłowym z dodatkiem popiołu (10% obj.) a najniższy z poletka, gdzie stosowano nawożenie osadem ściekowym przemysłowym ługowanym. Różnica wynosiła 1,42 Mg·ha⁻¹ i była nieistotna statystycznie. Zaobserwowano, że w przeciwieństwie do wyników uzyskanych w pierwszym roku badań, średni plon ziarna kukurydzy był najwyższy w obiekcie na którym stosowano nawożenie osadami pochodzenia przemysłowego (tab. 27).

Tabela 27. Plony ziarna kukurydzy na poletkach doświadczalnych

Rodzaj osadu	Plon ziarna ($\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$) w powtórzeniach			Średni plon ziarna ($\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$)
	a	b	c	
2005 (A)				
KF	7,16	8,67	5,61	7,15
KFW	5,92	7,20	4,45	5,85
KFK	7,21	7,92	4,79	6,64
KFŁ	7,96	8,14	4,35	6,82
PP	6,74	6,76	3,33	5,61
PŁ	6,32	7,37	3,82	5,84
K	7,73	7,05	4,53	6,44
2006 (B)				
KF	6,23	6,63	5,19	6,02
KFW	8,97	4,38	4,53	5,96
KFK	7,35	7,05	4,41	6,27
KFŁ	6,95	7,51	5,40	6,62
PP	9,87	6,42	5,06	7,12
PŁ	6,68	6,06	4,34	5,70
K	7,19	6,27	4,81	6,09
2007 (C)				
KF	7,22	7,65	6,54	7,14
KFW	8,14	7,48	6,36	7,33
KFK	7,28	7,65	6,02	6,98
KFŁ	6,71	6,88	4,47	6,02
PP	7,31	7,05	4,30	6,22
PŁ	7,14	6,71	5,33	6,39
K	7,48	6,54	4,73	6,25

$\text{NIR}_{A/abc}=1,45$; $\text{NIR}_{B/abc}=\text{n.i.}$; $\text{NIR}_{C/abc}=1,35$; $\text{NIR}_{ABC}=\text{n.i.}$

W trzecim roku badań średni najwyższy plon ziarna kukurydzy odnotowano na poletku nawożonym osadem ściekowym komunalnym, fermentowanym, wapnowanym a najniższy na poletku nawożonym osadem ściekowym komunalnym, fermentowanym, ługowanym. Różnica wynosiła $1,31 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ i była nieistotna statystycznie. Podobnie jak w pierwszym roku badań, średni plon ziarna kukurydzy na obiektach badawczych, na których stosowano nawożenie osadami ściekowymi pochodzenia komunalnego (KF, KFW, KFK) był wyższy (od 8,5 do 15,1%) niż na obiektach nawożonych osadami ściekowymi pochodzenia przemysłowego (tab. 27).

W przeciwieństwie do przedstawionych w cytowanej literaturze [33, 47, 48, 149] istotnych zmian masy plonu w zależności od rodzaju zastosowanego osadu ściekowego w przeprowadzonych badaniach nie stwierdzono tak jednoznacznych

związków. Należy jednak podkreślić, że wykazane w literaturze [33, 47, 48, 149] tendencje wzrostu masy plonu mogły wynikać m.in. z porównywania obiektów nawożonych osadami ściekowymi z obiektami nawożonymi mineralnie lub nienawożonymi. Natomiast w przeprowadzonych badaniach na poletku kontrolnym stosowano nawożenie obornikiem.

Na podstawie przeprowadzonej analizy wariancji nie stwierdzono występowania istotnych różnic średniej masy plonów między poszczególnymi latami badań (tab. 27). Niewielkie zróżnicowanie średnich plonów ziarna kukurydzy w zależności od zastosowanego rodzaju nawozu organicznego mogło wynikać ze zróżnicowanego tempa mineralizacji materiału organicznego a tym samym dostępności składników pokarmowych. Spostrzeżenia te są zbieżne z wynikami badań uzyskanymi przez Usmana i in. [151] oraz Gondka [45], którzy stwierdzili, że proces mineralizacji i wykorzystanie składników pokarmowych przez rośliny oraz wpływ na plonowanie roślin zależy m.in. od stopnia stabilizacji zastosowanych osadów ściekowych.

4.9 WPLYW STOSOWANIA OSADÓW ŚCIEKOWYCH NA WYSOKOŚĆ ORAZ OBSADĘ ROŚLIN

4.9.1 Wysokość roślin

Na podstawie przeprowadzonej analizy wariancji nie stwierdzono istotnych statystycznie różnic wysokości roślin kukurydzy w zależności od zastosowanego rodzaju nawożenia organicznego. Przeprowadzona analiza statystyczna nie wykazała także istotnych różnic średniej wysokości roślin między poszczególnymi latami badań (tab. 28).

Zaobserwowano, że średnia wysokość roślin wzrastała sukcesywnie w czasie trwania doświadczenia. W drugim roku badań średnia wysokość roślin była wyższa o 8,3% (dla obiektu kontrolnego) i o 15,9% (dla wariantu KFW) w porównaniu do pierwszego roku. Natomiast w trzecim roku, w odniesieniu do pierwszego, stwierdzono wzrost wysokości roślin średnio o 24,5% (dla wariantu KFŁ) i o 33,0% (dla wariantu KFW). Należy również podkreślić, że zarówno w drugim, jak i trzecim roku doświadczenia najwyższe przyrosty roślin zaobserwowano na poletkach nawożonych osadem ściekowym komunalnym, fermentowanym, wapnowanym (tab. 28).

Mimo, że otrzymane wyniki dotyczą wysokości roślin, porównano je z zawartymi w literaturze przedmiotu wynikami dotyczącymi plonu biomasy, ponieważ powszechnie przyjmuje się, że wysokość roślin jest jednym z czynników determinujących wielkość plonu biomasy.

Tabela 28. Długość roślin kukurydzy na poletkach doświadczalnych

Rodzaj osadu	Długość roślin (m) w powtórzeniach			Średnia długość roślin (m)
	a	b	c	
2005 (A)				
KF	1,51	1,45	1,41	1,46
KFW	1,34	1,42	1,37	1,38
KFK	1,49	1,41	1,32	1,41
KFL	1,48	1,50	1,37	1,45
PP	1,46	1,57	1,31	1,45
PŁ	1,46	1,52	1,25	1,41
K	1,55	1,46	1,31	1,44
2006 (B)				
KF	1,65	1,71	1,55	1,64
KFW	1,62	1,71	1,58	1,64
KFK	1,72	1,58	1,53	1,61
KFL	1,77	1,63	1,54	1,65
PP	1,85	1,63	1,53	1,67
PŁ	1,76	1,62	1,45	1,61
K	1,71	1,61	1,39	1,57
2007 (C)				
KF	2,02	2,08	1,99	2,03
KFW	2,16	2,11	1,92	2,06
KFK	2,09	1,94	1,95	1,99
KFL	2,16	1,94	1,64	1,92
PP	2,12	2,01	1,75	1,96
PŁ	2,21	2,02	1,80	2,01
K	2,19	1,87	1,71	1,92

NIR_{A/abc}=n.i.; NIR_{B/abc}=n.i.; NIR_{C/abc}=n.i.; NIR_{ABC}=n.i.

Stwierdzono, że otrzymane wyniki, mimo braku istotności statystycznej, są zbieżne z wynikami badań uzyskanymi przez Romanowską-Dudę i Grzesika [122], którzy na podstawie przeprowadzonego doświadczenia wykazali, że stosowanie osadów ściekowych w różnych dawkach wpływa na stopniowe zwiększenie plonu biomasy roślin (kukurydzy). Również Mohammad i Athamneh [92] zaobserwowali zwiększenie plonu biomasy roślin od 1,6 do 2,9 razy na skutek zastosowanego nawożenia osadami ściekowymi. Podobne wnioski wysunęli także Tamrabet i in. [149], którzy zaobserwowali, że na skutek nawożenia osadami ściekowymi ilość biomasy wzrosła średnio od 2,1 do 2,6 razy w zależności od zastosowanej dawki osadów ściekowych.

4.9.2 Obsada roślin

W pierwszym roku badań najwyższą średnią obsadą roślin charakteryzowały się poletka, na których stosowano nawożenie osadami ściekowymi komunalnymi, fermentowanymi, a najniższym nawożone osadem przemysłowym z dodatkiem popiołu (10% obj.). Różnica wynosiła 0,84 szt. · m⁻² i była istotna statystycznie (tab. 29). Zaobserwowano także, że średnia obsada roślin na obiektach wariantów KFW, KFK oraz KFŁ była istotnie wyższa niż na poletkach nawożonych osadami ściekowymi przemysłowymi z dodatkiem popiołu (10% obj.), różnice wynosiły odpowiednio 0,67 szt. · m⁻².

Tabela 29. Obsada roślin kukurydzy na poletkach doświadczalnych

Rodzaj osadu	Obsada roślin (szt. · m ⁻²) w powtórzeniach			Średnia obsada roślin (szt. · m ⁻²)
	a	b	c	
2005 (A)				
KF	7,75	7,50	7,75	7,67
KFW	7,50	7,50	7,50	7,50
KFK	7,25	7,75	7,50	7,50
KFŁ	7,25	7,75	7,50	7,50
PP	7,00	6,75	6,75	6,83
PŁ	7,25	7,00	7,75	7,33
K	7,00	7,25	7,00	7,08
2006 (B)				
KF	7,75	5,50	7,50	6,92
KFW	7,50	6,75	7,25	7,17
KFK	8,00	6,00	7,25	7,08
KFŁ	7,00	6,25	6,50	6,58
PP	7,25	7,00	7,25	7,17
PŁ	7,25	7,00	7,25	7,17
K	6,50	7,25	7,00	6,92
2007 (C)				
KF	7,75	6,00	7,25	7,00
KFW	7,25	6,75	6,25	6,75
KFK	6,75	7,25	7,50	7,17
KFŁ	6,75	7,25	7,75	7,25
PP	7,25	7,25	6,75	7,08
PŁ	7,25	5,50	5,75	6,17
K	7,00	7,00	6,75	6,92

NIR_{A/abc}=0,65; NIR_{B/abc}=n.i.; NIR_{C/abc}=n.i.; NIR_{ABC}=n.i.

W drugim i trzecim roku badań nie stwierdzono występowania istotnych różnic w obsadzie roślin. Przeprowadzona analiza wariancji nie wykazała także istotnych różnic średniej obsady roślin między poszczególnymi latami badań.

W przeciwieństwie do wyników badań uzyskanych przez Kitczaka i Czyżyka [72], którzy zaobserwowali zmniejszenie obsady roślin różnych gatunków traw o 41,4% po wprowadzeniu do podłoża osadu ściekowego, w przeprowadzonych badaniach nie stwierdzono takich zależności. W ciągu trzech lat trwania doświadczenia, w większości przypadków, średnia obsada w obiekcie kontrolnym była niższa niż średnia obsada w obiektach nawożonych osadami ściekowymi, co wskazuje na korzystny wpływ stosowania osadów ściekowych na liczebność roślin.

Analizując efekty stosowania osadów ściekowych stabilizowanych różnymi metodami na jakość gleby, przede wszystkim nie zaobserwowano ich negatywnego wpływu. Stwierdzono także, że nawożenie określonymi dawkami ($4,4 \text{ Mg m.o.} \cdot \text{ha}^{-1}$) osadów ściekowych nie spowodowało przekroczenia dopuszczalnej zawartości metali ciężkich i nie wpłynęło negatywnie na bilans związków azotu w glebie. Zaobserwowano, że stosowanie osadów ściekowych o różnych metodach stabilizacji, w założonych, stosunkowo niewielkich dawkach, spowodowało wzrost zawartości węgla organicznego, poprawę odczynu gleby, a także zwiększenie obsady roślin i ich wysokości.

Należy podkreślić, że zastosowane w przeprowadzonych badaniach dawki osadów wynikały z uwzględnienia przepisów [127, obecnie 132] ograniczających ilość wprowadzanych do gleby metali ciężkich. Maksymalne dawki substancji stosowanych do nawożenia gleb wynikają z różnych aktów prawnych, a każdy rodzaj nawożenia jest ograniczony innymi przepisami. W odniesieniu do komunalnych osadów ściekowych jest to rozporządzenie Ministra Środowiska w sprawie komunalnych osadów ściekowych [132], natomiast w odniesieniu do nawozów naturalnych i organicznych oraz środków poprawiających właściwości gleby i środków wspomagających uprawę roślin – ustawa o nawozach i nawożeniu [152].

W celu uzyskania bardziej efektywnego wpływu nawożenia osadami ściekowymi na żyzność gleby należy rozpatrzyć możliwość wprowadzania do gleby mieszanin osadów stabilizowanych różnymi metodami lub stosowania osadów w formie, w której zawartość metali ciężkich nie ograniczałaby ilości wprowadzonej materii organicznej i nie powodowała przekroczenia limitu zawartości tych pierwiastków w danej grupie gleby, określonej w rozporządzeniu Ministra Środowiska z dnia 1 września 2016 r. w sprawie sposobu prowadzenia oceny zanieczyszczenia powierzchni ziemi [128].

5. WNIOSKI

1. Na podstawie wyznaczonego współczynnika kierunkowego równania regresji liniowej (0,0116) stwierdzono niewielki wzrost zawartości węgla organicznego w glebie nawożonej osadami ściekowymi stabilizowanymi różnymi metodami.
2. Zawartość węgla organicznego w glebie nawożonej osadami ściekowymi stabilizowanymi różnymi metodami nie różniła się istotnie od zawartości węgla organicznego w glebie nawożonej obornikiem, co wskazuje na możliwość stosowania osadów jako substytutu obornika.
3. Nawożenie gleb osadami ściekowymi stabilizowanymi różnymi metodami nie spowodowało istotnego spadku lub wzrostu zawartości azotu ogółem i fosforu ogółem w glebie.
4. Stosowanie osadów ściekowych stabilizowanych różnymi metodami, podobnie jak stosowanie obornika, wpłynęło pozytywnie na zmianę odczynu gleby.
5. Nawożenie osadami ściekowymi stabilizowanymi różnymi metodami, przy założonej dawce, nie spowodowało przekroczenia dopuszczalnych zawartości (stężeń) metali ciężkich w glebie określonych w rozporządzeniu Ministra Środowiska z dnia 9 września 2002 r. w sprawie standardów jakości gleby i oraz standardów jakości ziemi [134, obecnie 128].
6. Stosowanie osadów ściekowych stabilizowanych różnymi metodami wpłynęło pozytywnie na wzrost wysokości oraz zwiększenie obsady roślin. Nie stwierdzono jednoznacznych zależności wzrostu lub spadku plonu ziarna kukurydzy w zależności od zastosowanego osadu ściekowego.
7. Stosowanie osadów ściekowych stabilizowanych różnymi metodami wywiera pozytywny wpływ zarówno na jakość gleby jak i zwiększenie wysokości i obsady roślin (plonu biomasy roślin), w związku z czym może stanowić istotny element prowadzenia zrównoważonej uprawy kukurydzy.
8. Wybór sposobu stabilizacji osadu wpływa na klasyfikację prawną przetworzonych osadów, z której wynikają ograniczenia dawkowania.

6. SPIS LITERATURY

- [1] Ajwa H.A., Tabatabai M.A., 1994. Decomposition of different organic materials in soils. *Biol. Fert. Soils*. 18(3), 175–182.
- [2] Aktualizacja Krajowego Programu Oczyszczania Ścieków Komunalnych. 2015. KZGW Warszawa 2015.
- [3] Alvarez E.A., Mochón M.C., Jiménez Sánchez J.C., Rodríguez M.T., 2002. Heavy metal extractable forms in sludge from wastewater treatment plants. *Chemosphere*. 47, 765-775.
- [4] Antoniadis V., Alloway B.J., 2002. The role of dissolved organic carbon in the mobility of Cd, Ni and Zn in sewage sludge-amended soils. *Environ. Pollut.* 117(3), 515-521.
- [5] Augustynowicz J., Pietkiewicz S., Kalaji M.H., Russel S., 2010. Wpływ nawożenia osadem ściekowym na wybrane parametry biologii gleby oraz wydajności aparatu fotosyntetycznego ślazuca pensylwańskiego (*Sida Hermaphrodita* (L.) Rusby). *Nauka Przyr. Technol.* 4(6), 1-10.
- [6] Babel S., del Mundo Dacera D., 2006. Heavy metal removal from contaminated sludge for land application: A review. *Waste Manage.* 26(9), 988-1004.
- [7] Bańkowski J., Hermann J., 2011. Mierzalna zmiana stanu lub funkcji gleby po zastosowaniu komunalnych osadów ściekowych. [W:] Współczesne problemy kształtowania i ochrony środowiska. Monografie nr 2p, Koc J. (red.). UWM Olsztyn.
- [8] Barbusiński K., 2016. Innowacyjne technologie oczyszczania ścieków komunalnych – kierunki rozwoju. Napędy i sterowanie. 1, 40-45.
- [9] Bernal M.P., Navarro F.A., Sánchez-Monedero A.M., Roig A. Cegarra J., 1998. Influence of sewage sludge compost stability and maturity on carbon and nitrogen mineralization in soil. *Soil Biol. Biochem.* 30, 305-313.
- [10] Bień J. Górski M., Gromiec M., Kacprzak M., Kamizela T., Kowalczyk M., Neczaj E., Pająk T., Westalska K., 2014. Ekspertyza, która będzie stanowić materiał bazowy do opracowania strategii postępowania z komunalnymi osadami ściekowymi na lata 2014-2020. PCz Częstochowa.
- [11] Bień J., 2007. Osady ściekowe – teoria i praktyka – wyd. II. Wyd. PCz Częstochowa.
- [12] Bień J., 2012. Zagospodarowanie komunalnych osadów ściekowych metodami termicznymi. *Inż. Ochr. Środ.* 15(4), 439-449.
- [13] Bień J., Neczaj E., Worwąg M., Grosser A., Nowak D., Milczarek M., Janik M., 2011. Kierunki zagospodarowania osadów w Polsce po roku 2013. *Inż. Ochr. Środ.* 14(4), 375-384.
- [14] Bień J., Nowak W., 2005. Zgazowanie osadów ściekowych. *Czysta Energia*. 4, 30-31.

- [15] Bień J., Wystalska K., 2008. Procesy termiczne w unieszkodliwianiu osadów ściekowych. Wyd. PCz Częstochowa.
- [16] Bień J., Wystalska K., 2011. Osady ściekowe, teoria i praktyka – wyd. III. Wyd. PCz Częstochowa.
- [17] Birošová L., Klčo1 S., Mackuľak T, Tichý J., Bodík I., Medved'ová A. 2016. Annual comparison of antibiotic resistant bacteria prevalence in sewage sludge. [In:] Book of abstracts 5th International Conference on the biodegradable waste in circular economy *Advances in sustainable sewage sludge management*, 14-18.
- [18] Bohdziewicz J., Kuglarz M., 2009. Kofermentacja bioodpadów komunalnych i osadów ściekowych. *Ochr. Środ. Zas. Nat.* 38, 36-43.
- [19] Bose S., Bhattacharyya A.K., 2008. Heavy metal accumulation in wheat plant grown in soil amended with industrial sludge. *Chemosphere.* 70(7), 1264-1272.
- [20] Boyd S.A., Lee E.S., Nelson D.W., 1980. Changes in the humic acid fraction of soil resulting from sludge application. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44, 1179-1186.
- [21] Bożym M., 2011. Wykorzystanie testów do oceny stopnia stabilizacji odpadów. *Prace Instytutu Ceramiki i Materiałów Budowlanych.* 7, 79-88.
- [22] Brady N.C., Well R.R., 2002. The nature and properties of soils 13th edition. *Agroforest. Syst.* 54 (3), 249.
- [23] Butarewicz A., 2013. Organizmy patogenne w osadach ściekowych – ich wykrywanie i unieszkodliwianie. OW PB Białystok.
- [24] Chen Q., An X., Li H., Su J., Ma Y., Zhu Y., 2016. Long-term field application of sewage sludge increases the abundance of antibiotic resistance genes in soil. *Environ. Int.* 92-93, 1-10.
- [25] Chodur M., 2008. Proces mokrego utleniania metodą przekształcania osadów ściekowych. *Wod. Kan.* 10, 48-49.
- [26] Cwojdzński W., 1999. Technologia otrzymywania i własności agrotechniczne nawozu otrzymanego na bazie osadów ściekowych. *Zesz. Nauk. Wydz. Bud. Inż. Środ. Pol. Koszalińskiej.* 15, 23-31.
- [27] Czekala J., 2009. Osady ściekowe – nawóz czy odpad? *Wodociągi Kanalizacja.* 1, 30-33.
- [28] Dahlin C.L., Williamson C.A., Collins W.K., Dahlin D.C., 2002. Sequential extraction versus comprehensive characterization of heavy metal species in brownfield soils. *Environ. Forensics.* 3, 191-201.
- [29] Diez T. 1981. Increasing organic matter of soils by sewage sludge. [In:] The influence of sewage sludge application on physical and biological properties of soils, Catroux G., L'Hermitte P., Suess E (eds.). Springer Netherlands.
- [30] Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2008/98/WE z dnia 19 listopada 2008 r. w sprawie odpadów oraz uchylająca niektóre dyrektywy [Dz.U.UE.L.08.312.3].

- [31] Dyrektywa Rady 1999/31/WE z dnia 26 kwietnia 1999 r. w sprawie składowania odpadów [Dz. Urz. WE.L.182/1 z 16.7.1999].
- [32] Dyrektywa Rady 86/278/EWG z dnia 12 czerwca 1986 r. w sprawie ochrony środowiska, w szczególności gleby w przypadku wykorzystywania osadów ściekowych w rolnictwie [Dz.U.WE.L.181 z 4.7.1986].
- [33] Fernández J.M., Plaza C., García-Gil J.C, Polo A., 2009. Biochemical properties and barley yield in a semiarid Mediterranean soil amended with two kinds of sewage sludge. *Appl. Soil Ecol.* 42, 18-24.
- [34] Fieducik J., Gawroński A., 2010. Suszenie i spalanie osadów ściekowych jako metoda ich utylizacji na przykładzie spalarni w Olsztynie. *Zesz. Nauk. PRzesz., Bud. Inż. Środ.* 57(271), 147–154.
- [35] Fijałkowski K., Kacprzak M., 2009. Wpływ dodatku osadów ściekowych na wybrane fizyczno-chemiczne i mikrobiologiczne parametry gleb zdegradowanych. *Inż. Ochr. Środ.* 12(2), 133-141.
- [36] Filipek T., 2004. Wpływ osadu ściekowego z mleczarni i wapna defekacyjnego na wybrane właściwości chemiczne gleby. *Rocz. Glebozn.* 55(1), 117-125.
- [37] Filipiak J., Przybyła C., Jakobsze M., 2008. Wpływ rolniczego wykorzystania osadów ściekowych na zmiany zasobności gleb. *Zesz. Probl. Post. Nauk Roln.* 532, 101-110.
- [38] Filkiewicz M., 2016. Wybrane aspekty ekonomiczne termicznego przekształcania osadów ściekowych. *Inż. Ekol. Młodym Okiem.* 23, 39-68.
- [39] Fytli D., Zabaniotou A., 2008. Utilization of sewage sludge in EU application of old and new methods – A review. *Renew. Sust. Energ. Rev.* 12(1), 116-140.
- [40] Gambuś F. Gorlach E., 1998. Chemical composition of sludges from sewage treatment plants of Cracow Province as a criterion of their usage. *Acta Agr. Silv. ser. Agr.* 36, 9-21.
- [41] Gasco G., Martinez-Inigo M., Lobo M., 2004. Soil organic matter transformation after a sewage sludge application. *Electron. J. Environ. Agric. Food Chem.* 3, 716-722.
- [42] Gawdzik J., 2012. Mobilność metali ciężkich w osadach ściekowych na przykładzie wybranej oczyszczalni ścieków. *Inż. Ekol.* 15(1), 5-15.
- [43] Gluzińska J., 2009. Komunalne osady ściekowe – surowiec z odpadu. *Chemik.* 10, 360-363.
- [44] Gondek K. 2009. Aspekty nawozowe i środowiskowe przemian i dostępności dla roślin wybranych pierwiastków w warunkach nawożenia różnymi materiałami organicznymi. *Zesz. Nauk. UR w Krakowie, Rozpr.* 452.
- [45] Gondek K., 2012. Wpływ nawożenia nawozami mineralnymi, obornikiem od trzody chlewnej i komunalnymi osadami ściekowymi na plon i niektóre wskaźniki jakości ziarna pszenicy jarej (*Triticum aestivum* L.). *Acta Agrophys.* 19(2), 289-302.

- [46] Gondek K., Filipek-Mazur B., 2005. Agrochemiczna ocena wartości nawozowej kompostów różnego pochodzenia. *Acta Agrophys.* 5(2), 271-282.
- [47] Gondek K., Filipek-Mazur B., 2006. Ocena efektywności nawożenia osadami ściekowymi na podstawie plonowania roślin i wykorzystania składników pokarmowych. *Acta Sci. Pol. Form. Cir.* 5(1), 39-50.
- [48] Gondek K., Filipek-Mazur B., 2008. Zmiany zawartości siarki w kukurydzy nawożonej materiałami organicznymi. *Acta Agrophys.* 11(3), 633-646.
- [49] Gonet S.S. 2007. Ochrona zasobów materii organicznej gleb. [W:] Rola materii organicznej w środowisku, Gonet S.S, Markiewicz M (red.). PTHS Wrocław, 7-29.
- [50] Gorlach E., Mazur T., 2002. *Chemia rolna*. Wyd. Nauk. PWN Warszawa.
- [51] Góra E., 1999. Przegląd nowoczesnych technologii zagospodarowania i wykorzystania stałych i płynnych odpadów komunalnych. [W:] Materiały z Ogólnopolskiej Konferencji Ekologicznej „Racjonalna gospodarka odpadami komunalnymi”, Nowy Sącz – Rożnów.
- [52] Górská E.B., Stępień W., 2008. Wpływ kompostu z osadu ściekowego na wybrane właściwości gleby. *Zesz. Probl. Post. Nauk Roln.* 533, 139-146.
- [53] Górski M., Zabawa S., 2008. Zarządzanie gospodarką odpadami: techniczno-organizacyjno-prawne aspekty gospodarki odpadami. PZITS Poznań.
- [54] Grobelak A., Stępień W., Kacprzak M., 2016. Osady ściekowe jako składnik nawozów i substytutów gleb. *Ecol. Engin.* 48, 52-60.
- [55] Hare P.D., Cress W.A., Van Staden J., 1999. Proline synthesis and degradation: a model system for elucidating stress-related signal transduction. *J. Exp. Bot.* 50, 413-434.
- [56] Harrison E.Z., Oakes S.R., Hysell M., Hay A., 2006. Organic chemicals in sewage sludges. *Sci. Total Environ.* 367, 481-497.
- [57] Hattori H., Mukai S., 1986. Decomposition of sewage sludges in soil as affected by their organic matter composition. *Soil Sci. Plant Nitr.* 32(3), 421-432.
- [58] Hsieh Y.P., Douglas L.A., Motto H.L. 1981. Modeling sewage sludge decomposition in soil: I. organic carbon transformation. *J. Environ. Qual.* 10, 54-59.
- [59] Hue N.V., Ranjith S.A., 1994. Sewage sludges in Hawaii: Chemical composition and reactions with soils and plants. *Water Air Soil Poll.* 72, 265-283.
- [60] Iżewska A., 2007. Wpływ nawożenia obornikiem, osadem ściekowym i kompostem z osadów ściekowych na właściwości gleby. *Zesz. Probl. Post. Nauk Roln.* 518, 85-92.
- [61] Jakubus M., 2006. Ocena przydatności osadów ściekowych w nawożeniu roślin. *Woda Środ. Ob. Wiew.* 6,2(18), 87-97.

- [62] Jamil M., Qasim M., Umar M., Rehman K., 2004. Impact of organic wastes (sewage sludge) on the yield of wheat (*Triticum aestivum* L.) in a calcareous soil. *Int. J. Agric. Biol.* 6, 465-467.
- [63] Janzen H.H., Kucey R.M.N., 1988. C, N, and S mineralization of crop residues as influenced by crop species and nutrient regime. *Plant Soil.* 106(1), 35-41.
- [64] Jezierska-Tyc S., Frąc M., 2008. Badania nad wpływem osadu z oczyszczalni ścieków mleczarskich na aktywność mikrobiologiczną i biochemiczną gleby. *Acta Agrophys. Rozpr. Monogr.* 3(160), 1-109.
- [65] Jezierska-Tys S., Frąc M., 2005. The effect of fertilization with sewage sludge from a dairy plant and with straw on the population numbers of selected microorganisms and respiration activity of brown soil. *Polish J. Soil Sci.* 38(2), 145-151.
- [66] Joniec J., Furczak J., 2007. Liczebność wybranych grup drobnoustrojów w glebie. *Ann. UMCS Sect. E.* 66(1), 105-116.
- [67] Kabata-Pendias A., Pendias H., 1999. *Biogeochemia pierwiastków śladowych.* Wyd. Nauk. PWN Warszawa.
- [68] Kalembasa S. 2003. Rolnicze wykorzystanie osadów ściekowych. [W:] *Substancje humusowe w glebach i nawozach*, Dębska B., Gonet S.S (red.). PTSH Wrocław, 63-74.
- [69] Kalembasa S., Kalembasa D., 1997. Wybrane chemiczne i biologiczne metody przeróbki osadów ściekowych. *Biotechnologia.* 1(36), 45-51.
- [70] Kalisz L., Nechay A., Kaźmierczuk M., Sałbud J., Szyprowska E., Gierczak A., Kostrzewa-Szulc J., 2003. Fizyczno-chemiczne i biologiczne, referencyjne metody badań komunalnych osadów ściekowych. Wyd. GIOŚ Warszawa.
- [71] Kazanowska J., Szaciło J., 2012. Analiza jakości osadów ściekowych oraz możliwości ich przyrodniczego wykorzystania. *Acta Agrophys.* 19(2), 343-353.
- [72] Kitczak T., Czyż H., 2012. Wpływ osadu komunalnego i kompostu z odpadów zieleni na jakość czterech mieszanek trawnikowych. *Inż. Środ.* 147(27), 86-94.
- [73] Kłapeć T., Cholewa A., 2012. Zagrożenia dla zdrowia związane ze stosowaniem nawozów organicznych i organiczno-mineralnych. *Med. Ogólna Nauki Zdr.* 18(2), 131-136.
- [74] Kołwzan B., 2005. *Podstawy mikrobiologii w ochronie środowiska.* OW PWr Wrocław.
- [75] Komunikat Komisji do Parlamentu Europejskiego, Rady, Europejskiego Komitetu Ekonomiczno-Społecznego i Komitetu Regionów pt. Zamknięcie obiegu - plan działania UE dotyczący gospodarki o obiegu zamkniętym [COM 2015.614].
- [76] Komunikat Komisji do Parlamentu Europejskiego, Rady, Europejskiego Komitetu Ekonomiczno-Społecznego i Komitetu Regionów pt. Ku

- gospodarce o obiegu zamkniętym „zero odpadów” dla Europy [COM 2014.398].
- [77] Koncewicz-Baran M., Gondek K., Korol J., 2014. Wpływ stosowania osadu ściekowego przekształconego biologicznie i termicznie na zawartość manganu w roślinach i w glebie. *Ecol. Engin.* 37, 17-30.
- [78] Kondracki J., 2002. *Geografia regionalna Polski*. Wyd. Nauk. PWN Warszawa.
- [79] Kozdraś M., 2006. Wykorzystanie azotu i fosforu przez kukurydzę nawożoną kompostem z osadów ściekowych. *Woda Środ. Ob. Wiej.* 6(1), 221-228.
- [80] Kulikowska D., Bilicka K., 2009. Analiza przemian materii organicznej i związków azotu podczas kompostowania osadów ściekowych. *Techn. Trans. Environ. Eng.* 11, 100-110.
- [81] Kunz M., Andrzejewski L., Skowron R., 2015. Komentarz do mapy sozologicznej w skali 1:50 000 : arkusz N-34-109-A Złotniki Kujawskie. Wyd. GGK Warszawa.
- [82] Kwiatkowska-Malina J., 2009. Analiza substancji humusowych gleb po wprowadzeniu węgla brunatnego. *Prace Naukowe PW w Warszawie, Geodezja z.* 45, 3-151.
- [83] Lekan S., Winiarska Z. 1991. Zależność plonowania i składu chemicznego roślin oraz właściwości gleby od składu chemicznego osadów ściekowych. [W:] *Możliwości rolniczego wykorzystania osadów ściekowych i kompostów z substancji odpadowych*, Koter Z (red.). IUNG Puławy, 5–28.
- [84] Loc N.T., Greinert H., 2000. Wpływ osadu ściekowego na mikroflorę gleby oraz wzrost i skład chemiczny grochu siewnego (*Pisum sativum* L.). *Folia U. Agr. Stet. Agricultura.* 83, 119-124.
- [85] Lorenc H., 2005. *Atlas Klimatu Polski*. IMGW Warszawa.
- [86] Malej J., 2000. Właściwości osadów ściekowych oraz wybrane sposoby ich unieszkodliwiania i utylizacji. *Rocz. Ochr. Środ.* 2, 69-101.
- [87] Malej J., 2004. *Odpady i osady ściekowe. Charakterystyka, unieszkodliwianie, zagospodarowanie*. Wyd. PK Koszalin.
- [88] Marando G., Jimenez P., Hereter A., Julia M., Ginovart M., Bonmati M., 2011. Effects of thermally dried and composted sewage sludges on the fertility of residual soils from limestone quarries. *Appl. Soil Ecol.* 49, 234-241.
- [89] Mazur Z., Mokra O., 2011. Wartość próchnicotwórcza i zawartość makroskładników w osadach ściekowych województwa warmińsko-mazurskiego. *Inż. Ekol.* 27, 131-135.
- [90] Merrington G., Oliver I., Smernik R.J., McLaughlin M.J., 2003. The influence of sewage sludge properties on sludge-borne metal availability. *Adv. Environ. Res.* 8, 21-36.
- [91] Mocek A., Drzymała S., Maszner P., 1997. *Geneza, analiza i klasyfikacja gleb*. Wyd. AR Poznań.

- [92] Mohammad M.J., Athamneh B.M., 2004. Changes in soil fertility and plant uptake of nutrients and heavy metals in response to sewage sludge application to calcareous soils. *J. Agron.* 3, 229-236.
- [93] Morel J.L., Guckert A. 1983. Influence of limed sludge on soil organic matter and soil physical properties. [In:] *The influence of sewage sludge application on physical and biological properties of soils*, Catroux G., L'Hermite P., Suess E (eds.). Riedel Publ. Comp Dordrecht, Boston, London, 25-42.
- [94] Moreno-Penaranda R., Lloret F., Alcaniz J.M., 2004. Effects of sewage sludge on plant community composition in restored limestone quarries. *Rest. Ecol.* 12(2), 290-296.
- [95] Nagar R., Sarkar D., Datta R., 2006. Effect of sewage sludge addition on soil quality in terms of metal concentrations. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.* 76, 823-830.
- [96] Najlepsze dostępne techniki (BAT) wytyczne dla branży celulozowo-papierniczej. 2005. NFOŚiGW MŚ Warszawa.
- [97] Napora A., Grobelak A., 2014. Wpływ osadów ściekowych na aktywność mikrobiologiczną i biochemiczną gleby. *Inż. Ochr. Środ.* 17(4), 619-630.
- [98] Nowak M., Kacprzak M., Grobelak A., 2010. Osady ściekowe jako substytut glebowy w procesach remediacji i rekultywacji terenów skażonych metalami ciężkimi. *Inż. Ochr. Środ.* 13(2), 121-131.
- [99] Obbard J., 2001. Ecotoxicological assessment of heavy metals in sewage sludge amended soils. *Appl. Geochem.* 16(11), 1405-1411.
- [100] Ociepa A., Pruszek K., Lach J., Ociepa E., 2008. Wpływ długotrwałego nawożenia gleb obornikiem i osadem ściekowym na wzrost zawartości metali ciężkich w glebach. *Ecol. Chem. Eng. S.* 15(1), 103-109.
- [101] Ociepa E., 2011. Wpływ nawożenia na zmianę rozpuszczalności cynku i niklu w glebie oraz pobieranie tych metali przez kukurydzę i ślazierkę pensylwański. *Inż. Ochr. Środ.* 14(1), 41-48.
- [102] Ociepa E., Ociepa-Kubicka A., Okoniewska E., Lach J., 2013. Immobilizacja cynku i kadmu w glebach w wyniku stosowania substratów odpadowych. *Rocz. Ochr. Środ.* 15, 1172-1786.
- [103] Patorczyk-Pytlik B., Gediga K. 2008. Wykorzystanie metody BCR do oceny przemian form Cu w glebach nawożonych kompostami z osadu ściekowego, część II. [W:] *Ekotoksykologia w Ochronie Środowiska*, Kołwzan B., Grabas K (red.). PZITS o. Dolnośląski, 297-302.
- [104] Pepper I.L., Brooks J.P., Gerba C.P., 2006. Pathogens in biosolids. *Adv. Agr. Els.* 90, 1-41.
- [105] Pilarski K., Pilarska A., 2009. Parametry procesu kompostowania. *Tech. Rol. Ogr. Leś.* 1,16-17.
- [106] PN-EN 12176:2004. Charakterystyka osadów ściekowych – Oznaczanie wartości pH.
- [107] PN-EN 12879:2004. Charakterystyka osadów ściekowych – Oznaczanie strat przy prażeniu suchej masy osadu.

- [108] PN-EN 12880:2004. Charakterystyka osadów ściekowych – Oznaczenie suchej pozostałości i zawartości wody.
- [109] PN-EN 13342:2002P. Charakterystyka osadów ściekowych – Oznaczenie azotu Kjeldahla.
- [110] PN-EN 13346:2002. Charakterystyka osadów ściekowych – Oznaczenie pierwiastków śladowych i fosforu – Metody ekstrakcji wodą królewską.
- [111] PN-EN 13657:2003. Charakteryzowanie odpadów – Roztworzenie w celu późniejszego oznaczenia pierwiastków rozpuszczalnych w wodzie królewskiej.
- [112] PN-EN ISO 11885. Metoda emisyjnej spektrometrii atomowej ze wzbudzeniem w plazmie indukcyjnie sprzężonej (ICP-OES).
- [113] PN-ISO 10390:1997. Jakość gleby – Oznaczenie pH.
- [114] PN-ISO 11047:2001. Jakość gleby - Oznaczenie kadmu, chromu, kobaltu, miedzi, ołowiu, manganu, niklu i cynku w ekstraktach gleby wodą królewską.
- [115] PN-R-04023:1996. Analiza chemiczno-rolnicza gleby – Oznaczenie zawartości przyswajalnego fosforu w glebach mineralnych.
- [116] PN-Z 19000-1:2001. Jakość gleby – Ocena stanu sanitarnego gleby – Wykrywanie bakterii z rodzaju *Salmonella*.
- [117] PN-Z 19000-4:2001. Jakość gleby – Ocena stanu sanitarnego gleby – Wykrywanie jaj pasożytów jelitowych *Ascaris lumbricoides* i *Trichuris trichiura*.
- [118] Polskie Towarzystwo Gleboznawcze, 2009. Klasyfikacja uziarnienia gleb i utworów mineralnych – PTG 2008. Rocz. Glebozn. 60(2), 5-16.
- [119] Ratajczak P., 2012. Stabilizacja tlenowa – przegląd sposobów obliczeniowych. Forum Eksploatatora. 6, 50-54.
- [120] Rebah F.B., Prevost D., Tyagi R.D., 2002. Growth of alfalfa in sludge-amended soils and inoculated with rhizobia produced in sludge. J. Environ. Qual. 31, 1339-1348.
- [121] Rocznik Statystyczny Rzeczypospolitej Polskiej. 2015. GUS Warszawa.
- [122] Romanowska-Duda Z.B., Grzesik M. 2008. Zastosowanie pomiarów biometrycznych roślin w monitorowaniu środowiska i produkcji biomasy do celów energetycznych. [W:] Ekotoksykologia w ochronie środowiska, Kołwzan B., Grabas K (red.).Wyd. PZITS, 327-334.
- [123] Rosik-Dulewska C., 2002. Podstawy gospodarki odpadami. Wyd. Nauk. PWN Warszawa.
- [124] Rosik-Dulewska C., Karwaczyńska U., Ciesielczuk T. 2011. Charakterystyka i możliwości wykorzystania komunalnych osadów ściekowych. [W:] Kompostowanie i mechaniczno-biologiczne przetwarzanie odpadów, Siemiątkowski G (red.). Wyd. Instytut Śląski Opole.
- [125] Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 16 lipca 2015 r. w sprawie dopuszczania odpadów do składowania na składowiskach [Dz.U.2015.0.1277].

- [126] Rozporządzenie Ministra Rolnictwa i Rozwoju Wsi z dnia 18 czerwca 2008 r. w sprawie wykonania niektórych przepisów ustawy o nawozach i nawożeniu [Dz.U.2008.119.765].
- [127] Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 1 sierpnia 2002 roku w sprawie komunalnych osadów ściekowych [Dz.U.2002.134.1140].
- [128] Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 1 września 2016 r. w sprawie sposobu prowadzenia oceny zanieczyszczenia powierzchni ziemi [Dz.U.2016.0.1395].
- [129] Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 15 maja 2015 roku w sprawie odzysku odpadów poza instalacjami i urządzeniami [Dz.U.2015.0.796].
- [130] Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 20 stycznia 2015 r. w sprawie procesu odzysku R10 [Dz.U.2015.0.132].
- [131] Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 27 września 2001 r. w sprawie katalogu odpadów [Dz.U.2001.112.1206].
- [132] Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 6 lutego 2015 r. w sprawie komunalnych osadów ściekowych [Dz.U.2015.0.257].
- [133] Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 9 grudnia 2014 r. w sprawie katalogu odpadów [Dz.U.2014.0.1923].
- [134] Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 9 września 2002 r. w sprawie standardów jakości gleby oraz standardów jakości ziemi [Dz.U.2002.165.1359, uznane za uchylone].
- [135] Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (WE) nr 1069/2009 z dnia 21 października 2009 r. określającego przepisy sanitarne dotyczące produktów ubocznych pochodzenia zwierzęcego, nieprzeznaczonych do spożycia przez ludzi i uchylającego rozporządzenie (WE) nr 1774/2002 (rozporządzenie o produktach ubocznych pochodzenia zwierzęcego) [Dz. Urz. UE L 300 z 14.11.2009, str. 1, z późn. zm.].
- [136] Sadecka Z., Myszograj S., 2011. Realizacja Krajowego Programu Oczyszczania Ścieków na przykładzie wybranych gmin. Zesz. Nauk. Inż. Środ. Uniw. Zielonogórskiego. 141(21), 16-27.
- [137] Sastre J., Vincente M.A., Lobo H.C., 1996. Influence of the application of sewage sludges on soil microbial activity. *Biores. Techn.* 57, 19-23.
- [138] Sidelko R., Siebielska I., Szymański K., Skubała A., Kołacz N., 2014. Ocena stabilności kompostu w czasie rzeczywistym. *Inż. Ochr. Środ.* 17(2), 221-230.
- [139] Siebielska I., Sidelko R., Walendziak B., Kołacz N., Skubała A., 2014. Ocena wykorzystania ekstrakcji za pomocą NaOH do oznaczania zawartości substancji humusowych w kompostowanym materiale. *Inż. Ochr. Środ.* 17(3), 441-448.
- [140] Siebielec G., Stuczyński T., 2008. Metale śladowe w komunalnych osadach ściekowych wytwarzanych w Polsce. *Proceed. ECOpol.* 2(2), 479-484.
- [141] Siuta J., 2003. Uwarunkowania i sposoby przyrodniczego użytkowania osadów ściekowych. *Inż. Ekol.* 9, 7-43.

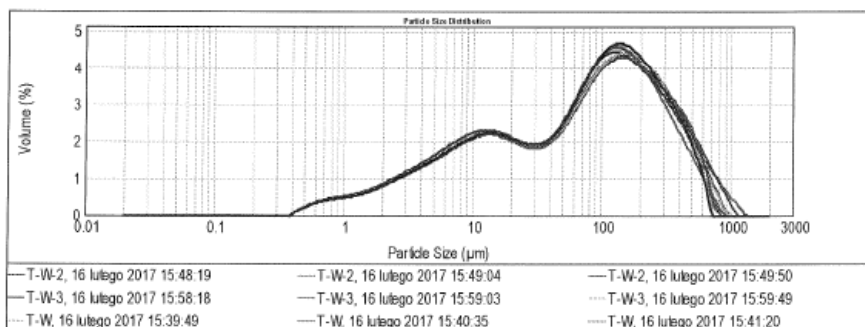
- [142] Smol M., Kulczycka J., Henclik A., Gorazda K., Wzorek Z., 2015. The possible use of sewage sludge ash (SSA) in the construction industry as a way towards a circular economy. *J. Clean. Prod.* 95, 45-54.
- [143] Strauch D., 1993. Przeżywalność drobnoustrojów chorobotwórczych i pasożytów w wydalinach, nawozie i szlamie ściekowym, cz. II. *Med. Wet.* 49(3), 117-121.
- [144] Sullivan D.M., Bary A.I., Thomas D.R., Franssen S.C., Cogger C.G., 2002. Food waste effects on fertilizer nitrogen efficiency, available nitrogen, and tall fescue yield. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66, 154-161.
- [145] Sullivan T.S., Stromberger M.E., Paschke M.W., Ippolito J.A., 2005. Long-term impacts of infrequent biosolids applications on chemical and microbial properties of semi-arid rangeland soil. *Biol. Fert. Soils.* 42(3), 258-266.
- [146] Szejniuk B., 2005: Sanitarno-higieniczne aspekty kompostowania odpadów. Wyd. ATR Bydgoszcz.
- [147] Szwedziak K., 2006. Charakterystyka osadów ściekowych i rolnicze wykorzystanie. *Inż. Rol.* 4, 297-302.
- [148] Środa K., Kijo-Kleczkowska A., Otwinowski H., 2012. Termiczne unieszkodliwianie osadów ściekowych. *Inż. Ekol.* 28, 67-81.
- [149] Tamrabet L., Bouzerzour H., Kribaa M., Makhlof M., 2009. The effect of sewage sludge application on durum wheat (*Triticum durum*). *Int. J. Agr. Biol.* 11, 741-745.
- [150] Uchwała nr 88 Rady Ministrów z dnia 1 lipca 2016 roku w sprawie Krajowego planu gospodarki odpadami [M.P.2016.784].
- [151] Usman A.R.A., Kuzyakov Y., Stahr K., 2004. Dynamics of organic C mineralization and the mobile fraction of heavy metals in a calcareous soil incubated with organic wastes. *Water Air Soil Poll.* 158(1), 401-418.
- [152] Ustawa z dnia 10 lipca 2007 roku o nawozach i nawożeniu [Dz.U.2007.143.1033 ze zm.].
- [153] Ustawa z dnia 13 kwietnia 2007 r. o zapobieganiu szkodom w środowisku i ich naprawie [Dz.U.2007.75.493 ze zm.].
- [154] Ustawa z dnia 14 grudnia 2012 r. o odpadach [Dz.U.2013.0.21 ze zm.].
- [155] Ustawa z dnia 27 kwietnia 2001 r. o odpadach [Dz.U.2001.628. ze zm.].
- [156] Vaca R., Lugo J., Martinez R., Steller M.V., Zavaleta H., 2011. Effect of sewage sludge and sewage sludge compost amendment on soil properties and Zea Mays L. plants (heavy metals, quality and productivity). *Rev. Int. Contam. Ambie.* 27(4), 303-311.
- [157] Warman P.R., Termeer W.C., 2005. Evaluation of sewage sludge, septic waste and sludge compost applications to corn and forage: yields and N, P and K content to crops and soils. *Bioresource Technol.* 96, 955-961.
- [158] Weiner R.F., Matthew R.A., 2007. *Environmental engineering* 4th ed. Elsevier New Delhi, 207-210.

- [159] Werle S., Wilk R.K., 2009. Energetyczne wykorzystanie osadów ściekowych. III Ogólnopolski Kongres Inżynierii Środowiska, Lublin Poland, 341-346.
- [160] Wieremiej W., Kuziemska B., Pieniak-Lendzion K., Trębicka J., Wyrębek H., 2015. Prawne aspekty przyrodniczego wykorzystania osadów ściekowych. Zesz. Nauk. UPH Siedlce ser. Adm. Zarz. 104, 207-218.
- [161] Wilk M., Gworek B., 2011. Metale ciężkie w osadach ściekowych. Ochr. Środ. Zasob. Nat. 39, 40-59.
- [162] Wołejko E., Wydro U., 2014. Przyrodnicze zagospodarowanie osadów ściekowych. Inż. Ekol. Młodym okiem. 6, 38-61.
- [163] Working dokument of sludge. 2000. 3RD draft, Brussels.
- [164] Worwąg M., Brzeska K., Zawieja I., Bień J., 2008. Stabilizacja beztlenowa osadów ściekowych pochodzących z przemysłu celulozowo-papierniczego. Proceed. Ecopol. 2(2), 493-498.
- [165] Woś A., 1999. Klimat Polski. Wyd. Nauk. PWN Warszawa.
- [166] Wójcikowska-Kapusta A., Baran S., Krzywy E., 2002. Wpływ nawożenia gleby lekkiej na wysokość plonów roślin uprawnych i zawartość w nich cynku. Acta Agrophys. 73, 339-347.
- [167] www.google.pl/maps
- [168] Wysokiński A., Kalembasa S., 2006. Wybrane parametry fizykochemiczne świeżych i kompostowanych osadów ściekowych oraz ich mieszanin z CaO lub popiołem z węgla brunatnego. Acta Sci. Pol. Form. Circ. 5(1), 51-61.
- [169] Zaujec A. 2007. Funkcje materii organicznej w obiegu związków węgla i żyzności gleb. [W:] Rola materii organicznej w środowisku, Gonet S.S, Markiewicz M (red.). PTHS Wrocław, 31-46.
- [170] Żukowska G., Flis-Bujak M., Baran S., 2002. Wpływ nawożenia osadem ściekowym na substancję organiczną gleby lekkiej pod uprawą wikliny. Acta Agrophys. 73, 357-367.

7. ZAŁĄCZNIKI

Załącznik 1. Klasyfikacja uziarnienia gleb i utworów mineralnych wg PTG 2008

Nazwa próbki: T-W	Nazwa SOP: SOP GLEBA JAREK listopad	Data i czas wykonania pomiaru: 16 lutego 2017 15:41:20	
Źródło i rodzaj próbki:	Pomiar wykonał: Piotr	Data i czas wykonania analizy: 16 lutego 2017 15:41:21	
Nr próbki:	Źródło wyniku: Measurement		
Symbol próbki: Gleba	Nazwa przystawki dyspergującej: Hydro 2000MU (A)	Model analizy: General purpose	Czułość pomiaru: Normal
Współ. zał. światła próbki: 1.520	Absorpcja próbki: 0.1	Zakres pomiarowy: 0.020 to 2000.000 μm	Obskuracja: 11.16 %
Nazwa dyspergantów: Woda	Współ. zał. światła dyspergantów: 1.330	Residuum ważone: 1.118 %	Emulacja wyniku: Off
Stężenie objętościowe próbki: 0.0184 %Vol	Rozpiętość wykresu: 4.236	Jednolitość wykresu: 1.32	Typ rozkładu: Volume
Powierzchnia właściwa: 0.57 m ² /g	Średnia D[3,2]: 10.530 μm	Średnia D[4,3]: 122.668 μm	
d(0.1): 4.301 μm	d(0.5): 75.670 μm	d(0.9): 324.835 μm	



Zawartość frakcji ogółem /w procentach/		Zawartość frakcji /w procentach/	
piasku (zakres 2,0 - 0,05 mm)	58,2 %	2,0 - 1,0 mm	0
pyłu (zakres 0,05 - 0,002 mm)	37,2 %	1,0 - 0,5 mm	2,57
ilu (zakres poniżej 0,002 mm)	4,6 %	0,5 - 0,25 mm	13,49
		0,25 - 0,10 mm	26,61
		0,1 - 0,05 mm	15,53
		0,05 - 0,02 mm	12,24
		0,02 - 0,002 mm	24,96
		0,002 - 0,0002 mm	4,6
		< 0,0002 mm	0

PIASEK %

PYŁ %

IL %

Klasyfikacja gleby: Grupa: GLINY, Podgrupa: glina piaszczysta, Symbol: gp

Notatki operatora:

Załącznik 2. Średnia temperatura powietrza w rejonie Bydgoszczy w latach 2005-2007

miesiąc \ rok	2005	2006	2007
	[°C]		
styczeń	0,4	-8,1	2,7
luty	-2,9	-2,9	-1,0
marzec	-0,4	-1,5	5,0
kwiecień	7,4	7,1	8,5
maj	12,2	12,5	13,8
czerwiec	14,9	16,8	18,2
lipiec	19,4	22,4	18,0
sierpień	16,3	16,6	17,8
wrzesień	14,8	15,2	12,4
październik	8,7	9,6	6,9
listopad	2,7	5,2	1,3
grudzień	-0,3	3,7	0,3

Załącznik 3. Sumy opadów atmosferycznych w rejonie Bydgoszczy w latach 2005 – 2007

miesiąc \ rok	2005	2006	2007
	[mm]		
styczeń	38,1	2,8	75,9
luty	28,7	19,1	28,0
marzec	22,5	27,4	47,9
kwiecień	34,8	77,0	17,6
maj	82,6	59,9	73,1
czerwiec	30,5	21,8	105,5
lipiec	33,6	24,2	104,7
sierpień	43,4	129,0	42,1
wrzesień	17,8	40,6	37,6
październik	15,1	12,1	19,9
listopad	20,7	33,9	22,3
grudzień	71,5	31,4	36,0