

Wpłynęło 19.10.2016 r.  
Zrecenzowano 20.12.2016 r.  
Zaakceptowano 17.01.2017 r.

A – koncepcja  
B – zestawienie danych  
C – analizy statystyczne  
D – interpretacja wyników  
E – przygotowanie maszynopisu  
F – przegląd literatury

# ZMIANY ZAWARTOŚCI ŻELAZA I MANGANU W GLEBIE LEKKIEJ NAWOŻONEJ OSADAMI ŚCIEKOWYMI I KOMPOSTAMI W CZASIE 6-LETNIEGO DOŚWIADCZENIA LIZYMETRYCZNEGO

**Agnieszka RAJMUND<sup>1)</sup> ABDEF, Marta BOŻYM<sup>2)</sup> ABCDF**

<sup>1)</sup> Instytut Technologiczno-Przyrodniczy w Falentach, Dolnośląski Ośrodek Badawczy we Wrocławiu

<sup>2)</sup> Politechnika Opolska, Wydział Mechaniczny, Katedra Inżynierii Środowiska

## Streszczenie

W pracy przedstawiono zmiany zawartości żelaza (Fe) i manganu (Mn) w glebie lekkiej piaszczystej corocznie nawożonej osadami ściekowymi i kompostami z osadów na podstawie wieloletniego doświadczenia lizymetrycznego prowadzonego w latach 2008–2013. Badano również mobilność tych pierwiastków z wykorzystaniem 1 M HCl. Osady i komposty charakteryzowały się dużą zawartością żelaza, znacznie większą niż gleba wykorzystana w doświadczeniu lizymetrycznym. Zawartość manganu w glebach, osadach i kompostach była zbliżona. Nawożenie gleb osadami ściekowymi i kompostami z osadów w nieznacznym stopniu wzbogaciło glebę w żelazo i mangan. Żelazo w osadach i kompostach oraz glebie występowało głównie w formach niemobilnych, natomiast mangan – w mobilnych. W kolejnych latach trwania doświadczenia lizymetrycznego nie stwierdzono znaczących zmian w mobilności obydwu metali w badanej glebie.

**Słowa kluczowe:** gleba lekka piaszczysta, kompost, mangan, osady ściekowe, żelazo

## WSTĘP

Osady ściekowe są nieodłącznym odpadem powstającym w procesie oczyszczania ścieków. Rozwój infrastruktury wodno-ściekowej oraz coraz większa skuteczność i nowe metody (procesy) oczyszczania ścieków powodują znaczne zwiększenie ilości osadów, które należy zagospodarować [BAUMAN-KASZUBSKA, SIKORSKI 2009; CZYŻYK, KOZDRAŚ 2004]. Według danych GUS [2015] w 2011 r.

**Do cytowania For citation:** Rajmund A., Bożym M. 2017. Zmiany zawartości żelaza i manganu w glebie lekkiej nawożonej osadami ściekowymi i kompostami w czasie 6-letniego doświadczenia lizymetrycznego. Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie. T. 17. Z. 1 (57) s. 101–113.

wytworzono ok. 519 tys. Mg osadów, a w 2014 r. 556 tys. Mg. W „Krajowym planie gospodarki odpadami” [Uchwała... 2022] zapisano, że „(...) preferowane w gospodarce osadami ściekowymi jest dążenie do maksymalizacji stopnia wykorzystania substancji biogenych zawartych w osadach przy jednoczesnym spełnieniu wszystkich wymogów dotyczących bezpieczeństwa sanitarnego, chemicznego oraz środowiskowego (...)”. Wskazuje to, że wiodącym kierunkiem zagospodarowania osadów powinno być nadal ich przyrodnicze wykorzystanie. Zaleca się to zwłaszcza małym, wiejskim oczyszczalniom ścieków. Ścieki te zazwyczaj charakteryzuje duża wartość nawozowa i małe zanieczyszczenie metalami ciężkimi [CZYŻYK, KOZDRAŚ 2004; RAJMUND, BOŻYM 2013; SIKORSKI, BAUMAN-KASZUBSKA 2008]. Według BAUMAN-KASZUBSKIEJ i SIKORSKIEGO [2011] zaletą małych oczyszczalni jest to, że powstaje w nich niewielka ilość osadów, które można łatwo zmagazynować i zagospodarować. Poza tym oczyszczalnie w większych aglomeracjach mogą mieć problem z utrzymaniem norm jakościowych osadów, a także z wygospodarowaniem odpowiednio dużej powierzchni terenu (z właściwymi warunkami gruntowo-wodnymi) do ich przyrodniczego wykorzystania. Osady ściekowe przed zastosowaniem powinny być zhigienizowane i przetworzone w taki sposób, aby ograniczyć ubytek składników pokarmowych. Odpowiednim rozwiązaniem jest proces kompostowania [BAUZA-KASZEWSKA i in. 2010; CZEKAŁA, SAWICKA 2006; CZEKAŁA i in. 2006; CZYŻYK, KOZDRAŚ 2004]. Z badań wynika, że osady ściekowe i komposty z osadów poprawiają strukturę użytków rolnych i nadają się do produkcji roślin przemysłowych i energetycznych, wpływając bezpośrednio na szybkość ich wzrostu [BAUMAN-KASZUBSKA, SIKORSKI 2008; JAKUBUS 2006; NIEMIEC, ZDEB 2013].

Na wartość nawozową osadów wpływa nie tylko duża zawartość substancji organicznej i makroelementów, ale także udział mikroelementów, w tym Fe i Mn. Pierwiastki te należą do metali o małej toksyczności, dlatego w przepisach dotyczących przyrodniczego wykorzystania osadów ściekowych nie są ujmowane. Osady ściekowe są bardzo zasobne w żelazo ze względu na stosowanie w procesie oczyszczania ścieków jego związków, np. jako koagulantów. Ilość żelaza występująca w osadach ściekowych może być nawet kilkukrotnie większa niż w oborniku [GONDEK, FILIPEK-MAZUR 2004; RESZEL, GŁOWACKA 2004]. Żelazo i mangan należą do mikroelementów niezbędnych do życia organizmów żywych. Biorą udział w procesach biologicznych (fotosyntezie i oddychaniu), pełniąc funkcje fizjologiczne i biochemiczne w roślinach [KABATA-PENDIAS, PENDIAS 1999]. W glebie obydwa te pierwiastki występują przeważnie w formie kompleksów mineralno-organicznych. Kompleksy te mają zdolność do wiązania innych metali obecnych w roztworze glebowym. Pewna ilość tych pierwiastków występuje w formach mobilnych i jest bezpośrednio dostępna dla roślin. Na biodostępność Fe i Mn wpływa głównie odczyn gleby. Zmniejszenie przyswajalności tych metali obserwowano w glebach alkalicznych i po wapnowaniu [BRZEZIŃSKI, SOSULSKI 2009; KABATA-PENDIAS, PENDIAS 1999; ROGOŹ 2000; SYKUT i in. 1998], a także

w glebach o zachwianej równowadze chemicznej. Żelazo jest jednym z bardziej mobilnych pierwiastków w glebie, a stopień jego ruchliwości zmienia się wraz ze zmianą warunków środowiskowych. Organiczne połączenia żelaza zwiększają na ogół jego ruchliwość, nie dotyczy to jednak procesu adsorpcji przez próchnicę glebową [MARTYN, NIEMCZUK 2011]. Mangan także występuje w glebie w dużych ilościach, jednak tylko niewielka jego część jest dostępna dla roślin. W roślinach gromadzi się głównie w systemie korzeniowym [GONDEK 2009]. NOWOSIELSKI [1958] podaje, że mangan w glebie występuje zwykle w formie dwuwartościowych kationów, obecnych zarówno w roztworze glebowym, jak i związanych w kompleksie sorpcyjnym. W dużych ilościach jest też wiązany przez próchnicę i koloidy mineralne. Potwierdzają to badania JAWORSKIEJ [2012], która stwierdziła największą zasobność w ten metal poziomów próchnicznych gleby, natomiast najmniejszą w skale macierzystej. Autorka ta podaje, że udział mobilnych form manganu w glebach nie przekracza 5% zawartości ogólnej. Według NOWOSIELSKIEGO [1958] zawartość rozpuszczalnych form tego pierwiastka w glebie maleje wraz z głębokością, co wiąże się ze zmniejszeniem zawartości próchnicy. Autor ten podaje także, że gleby kwaśniejsze (pH poniżej 5,5) zawierają zwykle znaczną część manganu dostępnego dla roślin i na ogół nie wymagają dodatkowego nawożenia tym pierwiastkiem. Wraz ze zwiększającym się pH gleby mangan dwuwartościowy utlenia się do wielowartościowego.

Żelazo i mangan tworzą tlenki sorbujące metale obecne w roztworze glebowym. KARCZEWSKA [2004] podaje, że tlenki żelaza w glebach są głównymi sorbentami metali występujących w formach anionów, np. chromianów, arsenianów czy molibdenianów. Dodatkowo wiążą te pierwiastki w wyniku wytrącania lub formowania minerałów. Według tej autorki w większości typów gleb żelazo występuje w postaci słabo krystalicznych tlenków oraz niekrystalicznych powłok tlenkowych osadzonych na cząstkach gleby, rzadko w postaci czystych kryształów żelaza, a zwiększenie rozpuszczalności Fe i Mn w środowisku kwaśnym jest związane z rozpuszczaniem tych tlenków. W wyniku procesów redukcyjnych z uwodnionych tlenków manganu i żelaza do roztworu przechodzą najpierw jony  $Mn^{2+}$ , a następnie jony  $Fe^{2+}$ . Ich rozpuszczanie wiąże się z uwalnianiem wcześniej zaadsorbowanych i okludowanych metali ciężkich [KARCZEWSKA 2002; 2008].

Znajomość form chemicznych metali w glebie jest ważnym wskaźnikiem ich biodostępności i mobilności w profilu glebowym. Każdy pierwiastek, należący do mikro- lub makroelementów, po przekroczeniu pewnej zawartości w glebie może stać się toksyczny dla roślin. Spożywanie takich roślin przez zwierzęta może powodować zaburzenia procesów metabolicznych [FALKOWSKI i in. 2000; KABATA-PENDIAS, PENDIAS 1999]. W roślinach wykorzystywanych na pasze zawartość metali ciężkich jest normowana [BENEDYCKI i in. 2001; GORLACH 1991; SYMANOWICZ, KALEMBASA 2009]. Analiza stopnia wymywania metali powinna być wykonywana zwłaszcza w przypadku gleb kwaśnych i gleb nawożonych odpadowym

materiałem organicznym (np. osadami ściekowymi, kompostami) [SYMANOWICZ, KALEMBASA 2009].

Celem pracy była ocena zmian zawartości żelaza i manganu oraz ich biodostępności w glebie lekkiej nawożonej osadami ściekowymi i kompostami z osadów czasie 6-letniego doświadczenia lizymetrycznego prowadzonego w latach 2008–2013.

## MATERIAŁ I METODY BADAŃ

Materiałem badawczym były osady ściekowe, wytworzone z nich komposty i gleba lekka. Osady ściekowe pochodziły z wiejskiej, mechaniczno-biologicznej oczyszczalni ścieków o przepustowości do  $160 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ , zlokalizowanej w województwie dolnośląskim, w miejscowości Dobrzeń. Co roku na wiosnę osady poddawano kompostowaniu w pryzmie na wolnym powietrzu z dodatkiem materiału strukturotwórczego (świeża trawa i trociny), na specjalnie przygotowanej płycie kompostowej. Kompostowanie trwało około 6–7 miesięcy, następnie kompost dojrzewał w pryzmie.

Doświadczenie prowadzono w latach 2008–2013 w lizymetrach wypełnionych glebą lekką (piasek gliniasty). Lizymetry wypełniono tak, aby odzwierciedlały rzeczywisty profil glebowy. Lizymetry o średnicy 100 cm ( $A = 0,785 \text{ m}^2$ ) i głębokości 130 cm są całkowicie zanurzone w gruncie. Warunki w lizymetrach były zbliżone do naturalnych warunków polowych. Doświadczenie prowadzono w trzech powtórzeniach dla każdego wariantu (bez nawożenia, nawożenie osadem ściekowym i nawożenie kompostem). Osady ściekowe i komposty stosowano do nawożenia roślin – miskanta olbrzymiego (*Miscanthus x giganteus* Greef et Deu.) i ślazuwca pensylwańskiego (*Sida hermaphorodita* Rusby).

Do nawożenia wykorzystano tylko osad ściekowy i kompost z osadów, z odpowiednim nawożeniem azotem w ilości  $200 \text{ kg N} \cdot \text{ha}^{-1}$  (czyli  $15,7 \text{ g N}$  na lizymetr). Ilości dostarczane na lizymetr wynosiły  $0,3\text{--}0,4 \text{ kg s.m. osadów ściekowych}$  i  $0,5\text{--}0,8 \text{ kg s.m. kompostów}$  (w zależności od wilgotności i zawartości w nich azotu). Corocznie przed nawożeniem pobierano do analiz każdą partię osadów, kompostów oraz gleby z warstwy ornej 0–20 cm. Badania prowadzono na terenie Stacji Badawczej Dolnośląskiego Ośrodka Badawczego, należącej do Instytutu Technologiczno-Przyrodniczego.

Do analiz pobrano próbki gleb z każdego wariantu: gleby kontrolne (nienawożone) (G), gleby nawożone kompostem (GC), gleby nawożone osadem ściekowym (GSS), osad ściekowy (SS), kompost (C) dla obydwu roślin. Uzyskane wyniki analiz zawartości ogólnej oraz wymywalności 1M HCl żelaza i manganu w badanych glebach były zbliżone dla każdego wariantu, niezależnie od gatunku rośliny. Dlatego zdecydowano się na uśrednienie wyników z każdego z wariantów, tj. gleby nienawożonej oraz gleb nawożonych (osadem i kompostem).

Ogólną zawartość żelaza i manganu w próbkach oznaczono techniką FAAS, po mineralizacji mikrofalowej w wodzie królewskiej. Do sprawdzenia poprawności metodyki badań wykorzystano dwa rodzaje certyfikowanych materiałów odniesienia: „Sewage sludge amended soil” CRM005-050 i „Metals in soil” CRM028-050 firmy Tusnovics. Zgodnie z zaleceniami producenta materiałów certyfikowanych mineralizację wykonano w wodzie królewskiej i oznaczono zawartość ogólną metali techniką płomieniową AAS. Uzyskano wartości odzysku na poziomie odpowiednio: Fe 98 i 99% oraz Mn 97 i 96%. Dodatkowo przeprowadzono badanie form mobilnych tych metali. W tym celu wykorzystano 1 M HCl, zgodnie z metodyką stosowaną w stacjach chemiczno-rolniczych do określania biodostępności metali w glebach. Wyniki uzyskane w ekstrakcji w 1 M HCl przeliczano na zawartość ogólną badanych metali w celu obliczenia udziałów procentowych form mobilnych.

## WYNIKI BADAŃ I DISKUSJA

Średnią ogólną zawartość żelaza i manganu w glebach (G, GC, GSS), osadach ściekowych (SS) oraz kompostach (C) z poszczególnych lat badań przedstawiono w tabeli 1. Na tej podstawie dokonano oceny zmian zawartości Fe i Mn w glebach, osadach i kompostach. Procentowy udział wymywanych form Fe i Mn (biodostępność) w badanych próbkach obliczono w odniesieniu do zawartości ogólnej tych metali (tab. 2).

Zawartość ogólna żelaza w glebie kontrolnej (bez dodatków, nienawożonej – G) mieściła się w granicach 1 755–1 956 mg Fe·kg<sup>-1</sup> s.m. średnia z 6 lat wynosiła 1 831 mg Fe·kg<sup>-1</sup> s.m., a zawartość manganu odpowiednio 74–89 mg Mn·kg<sup>-1</sup> s.m. i 82 mg Mn·kg<sup>-1</sup> s.m. (tab. 1). Zawartość badanych pierwiastków nie zmieniała się znacząco w kolejnych latach trwania doświadczenia (większa w glebie z dodatkami), co może świadczyć o niewielkim wymywaniu Fe i Me z gleby. Badania lizymetryczne prowadzone przez BARAN i in. [2011] wykazały stosunkowo znaczne wymywanie żelaza w porównaniu z pozostałymi metalami z nawożonej gleby łąki górskiej. W odciekach lizymetrycznych cytowani autorzy uzyskali największe stężenie żelaza spośród badanych metali. Zawartość żelaza i manganu w glebach może się znacznie różnić w zależności od gatunku gleby oraz poziomu genetycznego. MARTYN i NIEMCZUK [2011] w glebach rdzawych różnie użytkowanych stwierdzili 1 600–2 300 mg Fe·kg<sup>-1</sup> s.m. W różnych poziomach genetycznych gleb wzbogaconych w żelazo KALEMBASA i in. [2001] oznaczyli od 560 do 97 904 mg Fe·kg<sup>-1</sup> s.m. oraz od 6,72 do 4 223 mg Mn·kg<sup>-1</sup> s.m. HANEKLAUS i in. [1999a] podają zawartość Fe i Mn w glebie nienawożonej na poziomie 5 592 mg Fe·kg<sup>-1</sup> s.m. oraz 393 mg Mn·kg<sup>-1</sup> s.m. Po nawiezieniu gleby osadami ściekowymi w dawce 75 Mg·ha<sup>-1</sup> autorzy ci stwierdzili, że zawartość żelaza i manganu nieznacznie się zwiększyła.

**Tabela 1.** Średnie ogólne zawartości żelaza i manganu oraz odchylenie standardowe w badanych glebach (gleby kontrolne nienawożone – G, gleby nawożone kompostem – GC, gleby nawożone osadem ściekowym – GSS), osadach ściekowych (SS) i kompostach z osadów (C)

**Table 1.** Overall average and standard deviation for iron and manganese content in analyzed soils (unfertilized soils, control – G, soil fertilized with compost – GC, soil fertilized with sewage sludge – GSS), sewage sludge (SS) and sludge's compost (C)

Lata Years	G		GC		GSS		SS		C	
	$\bar{x}$	<i>SD</i>	$\bar{x}$	<i>SD</i>	$\bar{x}$	<i>SD</i>	$\bar{x}$	<i>SD</i>	$\bar{x}$	<i>SD</i>
	<b>Żelazo (Fe) mg·kg<sup>-1</sup> s.m.</b>					<b>Iron (Fe), mg·kg<sup>-1</sup> DM</b>				
2008	1 775	±40	1 798	±41	1 802	±54	3 980	±156	3 476	±117
2009	1 763	±38	2 132	±123	2 171	±37	3 108	±112	3 607	±87
2010	1 824	±111	2 180	±45	2 144	±53	2 675	±87	2 994	±56
2011	1 858	±56	2 168	±40	2 152	±77	2 970	±105	3 126	±108
2012	1 956	±50	2 262	±63	2 186	±82	4 329	±142	3 315	±79
2013	1 810	±72	2 157	±57	2 239	±73	3 026	±109	2 930	±92
Średnia z 6 lat Average of 6 years	1 831	±61	2 116	±62	2 116	±63	3 348	±119	3 241	±90
	<b>Mangan (Mn) mg·kg<sup>-1</sup> s.m.</b>					<b>Manganese (Mn) mg·kg<sup>-1</sup> DM</b>				
2008	74	±3	79	±4	78	±4	148	±9	162	±5
2009	76	±2	89	±7	89	±4	148	±5	162	±5
2010	81	±3	96	±3	93	±5	95	±8	193	±6
2011	82	±4	95	±4	96	±1	75	±4	97	±4
2012	88	±4	102	±4	101	±2	81	±5	108	±5
2013	89	±3	111	±5	109	±5	88	±4	104	±6
Średnia z 6 lat Average of 6 years	82	±3	95	±5	94	±4	106	±6	138	±5

Objaśnienia:  $\bar{x}$  = średnia arytmetyczna, *SD* = odchylenie standardowe.

Explanations:  $\bar{x}$  = average, *SD* = standard deviation.

Źródło: opracowanie własne. Source: own study.

Zastosowanie osadów ściekowych (GSS) i kompostów z osadów (GC) do nawożenia spowodowało zwiększenie zawartości ogólnej żelaza i manganu w porównaniu z zawartością w glebie kontrolnej (G) (tab. 1). Zawartość Fe i Mn w glebie nawożonej kompostem (GC) wynosiła 1 798–2 262 mg Fe·kg<sup>-1</sup> s.m. i 79–111 mg Mn·kg<sup>-1</sup> s.m., a w glebie nawożonej osadami (GSS) odpowiednio 1 802–2 239 mg Fe·kg<sup>-1</sup> s.m. i 78–109 mg Mn·kg<sup>-1</sup> s.m.

W badanych osadach ściekowych zawartość ogólna żelaza była zmienna i wynosiła od 2 675 do 4 329 mg Fe·kg<sup>-1</sup> s.m., a średnio z 6 lat 3 348 mg Fe·kg<sup>-1</sup> s.m. W kompostach z osadów zawartość tego pierwiastka była nieco mniejsza i wynosiła 2 930–3 607 mg Fe·kg<sup>-1</sup> s.m., średnio z okresu badań 3 241 mg Fe·kg<sup>-1</sup> s.m. (tab. 1). Osady ściekowe są zwykle bardzo zasobne w żelazo w porównaniu np. z obor-

nikiem. Ilość żelaza w osadach ściekowych może być nawet kilkakrotnie większa niż w oborniku [GONDEK, FILIPEK-MAZUR 2004; RESZEL, GŁOWACKA 2004]. WYSOKIŃSKI [2011] stwierdził w osadach surowych pochodzących z oczyszczalni ścieków z Siedlec i Łukowa obecność żelaza na poziomie 12 327–12 436 mg Fe·kg<sup>-1</sup> s.m., a w oborniku jedynie 2 347 mg Fe·kg<sup>-1</sup> s.m. SYMANOWICZ i KALEMBASA [2009] podają zawartość Fe w osadach ściekowych wynoszącą 3 344 mg Fe·kg<sup>-1</sup> s.m., w oborniku zaś 578 mg Fe·kg<sup>-1</sup> s.m. HANEKLAUS i in. [1999a, b] – badając osady z oczyszczalni terenów niezanieczyszczonych oraz dużych aglomeracji (Warszawa, Katowice, Gdańsk) – uzyskali duży rozrzut wyników, od 4 336 do 92 810 mg Fe·kg<sup>-1</sup> s.m., jednak nie stwierdzili wpływu pochodzenia osadów na zawartość żelaza. Osady ściekowe mogą być wykorzystywane do nawożenia roślin, wówczas udział składników pokarmowych w glebie może ulec zmianie, co należy uwzględnić w trakcie obliczania faktycznego zapotrzebowania roślin. DMOCHOWSKI i in. [2011] – prowadząc badania nad wykorzystaniem osadów pofermentacyjnych do nawożenia traw – stwierdzili zawartość żelaza w osadach na poziomie 8 408 mg Fe·kg<sup>-1</sup> s.m. Po trzech miesiącach od wysiania traw (na podłożu z osadów) zanotowali 5 667 mg Fe·kg<sup>-1</sup> s.m., czyli o 32,6% mniej od stanu wyjściowego, co spowodowane było głównie pobieraniem tego pierwiastka przez trawy.

W badanych osadach ściekowych i kompostach zawartość ogólna manganu była znacznie mniejsza niż żelaza. Mieściła się w granicach: w osadach 75–148 mg Mn·kg<sup>-1</sup> s.m. (średnio z 6 lat 106 mg Mn·kg<sup>-1</sup> s.m.), i 97–162 mg Mn·kg<sup>-1</sup> s.m. w kompostach z osadów (średnio 138 mg Mn·kg<sup>-1</sup> s.m.) – tabela 1. W przypadku kompostów prawdopodobnie materiał strukturotwórczy (trawa i trociny) był zasobny w ten składnik, w związku z czym większa jego zawartość niż w osadzie. Zbliżone wyniki uzyskał CZEKAŁA [2012], który stwierdził w osadach ściekowych zawartość manganu w granicach 115,8–210,6 mg Mn·kg<sup>-1</sup> s.m. Autor ten nie zanotował wpływu manganu w osadzie ściekowym na gromadzenie tego pierwiastka przez rośliny, niezależnie od stosowanej dawki i źródła ich pochodzenia. W osadach ściekowych, pochodzących z 13 oczyszczalni północno-wschodniej Polski, HANEKLAUS i in. [1999a, b] podają bardzo duży rozrzut zawartości Mn, w granicach 113–1 363 mg Mn·kg<sup>-1</sup> s.m. WYSOKIŃSKI i KALEMBASA [2009] w osadach ściekowych stwierdzili 338,2–476,1 mg Mn·kg<sup>-1</sup> s.m. i 401,9–460,6 mg Mn·kg<sup>-1</sup> s.m. w kompostach z osadów. W badaniach KONCEWICZ-BARAN i in. [2014] zawartość manganu w osadach i glebie była na zbliżonym poziomie, tj. 345 i 323 mg Mn·kg<sup>-1</sup> s.m. W osadach pochodzących z greckiej oczyszczalni ścieków SUCHKOVA i in. [2014] oznaczyli zawartość Fe i Mn na poziomie 23 832 mg Fe·kg<sup>-1</sup> s.m. i 219,3 mg Mn·kg<sup>-1</sup> s.m. WANG i in. [2006] badali osady z jednej oczyszczalni w Chinach po kilku etapach ich przetwarzania (zagęszczanie, odwadnianie, suszenie), stwierdzając 12 457,6–18 236,5 mg Fe·kg<sup>-1</sup> s.m. i 214,5–260,5 mg Mn·kg<sup>-1</sup> s.m. W osadach pochodzących z oczyszczalni ścieków w Madrycie WALTER i in. [2006] stwierdzili dużą zmienność zawartości żelaza (9 330–16 390 mg Fe·kg<sup>-1</sup>

s.m.) w zależności od sposobu przetworzenia tych osadów. Autorzy ci nie stwierdzili większych rozbieżności w zawartościach manganu ( $143\text{--}215 \text{ mg Mn}\cdot\text{kg}^{-1}$  s.m.). NOMEDA i in. [2008] w surowych osadach ściekowych zanotowali zawartość manganu na poziomie  $46 \text{ mg Mn}\cdot\text{kg}^{-1}$  s.m. i nie stwierdzili wpływu kompostowania na zmianę zawartości tego pierwiastka.

Udział mobilnych form żelaza (1M HCl) nie zmieniał się w kolejnych latach doświadczenia w glebie nienawozonej (G – 19–25%, średnio 21%) – tabela 2, udział manganu zaś zmieniał się w granicach od 33 do 52% (tab. 2). Można przypuszczać, że w glebie nienawozonej żelazo znajdowało się głównie w formach niemobilnych, w odróżnieniu od manganu, który wykazywał większą mobilność. MARTYN i NIEMCZUK [2011] podają udział form mobilnych żelaza ekstrahowanego 1 M HCl na poziomie 35% w różnych profilach glebowych pól uprawnych. KALEMBASA i in. [2001] stwierdzili, że oba te pierwiastki występują w glebach przeważnie w formach niedostępnych dla roślin.

**Tabela 2.** Udział (%) mobilnych form żelaza i manganu w badanych glebach (gleby kontrolne, nienawozone – G, gleby nawożone kompostem – GC, gleby nawożone osadem ściekowym – GSS), osadach ściekowych (SS) i kompostach z osadów (C)

**Table 2.** Percentage share of iron and manganese calculated from total content of those metals in analyzed soils samples (unfertilized soils, control – G, soil fertilized with compost – GC, soil fertilized with sewage sludge – GSS), sewage sludge (SS) and sludge's compost (C)

Pierwiastek Element	Składnik Component	Lata Years						$\bar{x}$ 2008–2013
		2008	2009	2010	2011	2012	2013	
Żelazo (Fe) Iron (Fe)	G	19	19	19	19	25	23	21
	GC	20	21	21	20	28	23	22
	GSS	19	21	22	20	26	23	22
	SS	15	9	12	10	5	7	10
	C	15	20	12	14	11	12	14
Mangan (Mn) Manganese (Mn)	G	46	47	34	35	33	52	41
	GC	43	45	39	40	36	56	43
	GSS	41	47	38	41	36	44	41
	SS	37	40	53	48	31	32	40
	C	46	39	45	51	45	47	46

Objaśnienia:  $\bar{x}$  = średnia arytmetyczna. Explanations:  $\bar{x}$  = average.

Źródło: opracowanie własne. Source: own study.

Udział mobilnych form rozpatrywanych pierwiastków w glebie w wariantach z nawożeniem (GC i GSS) był zbliżony i nieznacznie większy niż na wariacie kontrolnym (tab. 2). Udział form żelaza w glebie nawożonej wynosił 20–28% (GC) i 19–26% (GSS), średnio 22% (GC i GSS), natomiast manganu 36–45% średnio 41% (GSS) i 36–56% średnio 43% (GC) – tabela 2. Nie stwierdzono wpływu czasu trwania doświadczenia na zmiany mobilności badanych pierwiastków. Procentowy



udział mobilnych form żelaza i manganu w glebach nawożonych osadami nie zawsze odzwierciedla ich stopień biodostępności. WYSOKIŃSKI [2011] nie stwierdził zależności między zawartością najbardziej mobilnych form manganu w glebie nawożonej osadami ściekowymi a zawartością tego mikroelementu w roślinach. Stwierdził natomiast wpływ wapnowania na zmniejszenie biodostępności Mn. CZEKAŁA [2012] także nie zaobserwował wpływu zawartości manganu pochodzącego z osadów ściekowych na kumulację w roślinach. Według JAKUBUS [2006] nawożenie gleb osadami ściekowymi powoduje niewielkie zmiany składu chemicznego roślin. HANEKLAUS i in. [1999b] w badaniach nawożenia gleb osadami ściekowymi nie stwierdzili zwiększonego pobierania żelaza przez badane rośliny, ale potwierdzili, że na kumulację manganu wpłynęła zasobność osadów ściekowych w ten pierwiastek.

W przeprowadzonych badaniach wymywalności stwierdzono, że w osadach i kompostach żelazo występowało głównie w formach niemobilnych. W ekstrakcji 1 M HCl wymyło żelazo z osadów na poziomie 5–15% (średnio z 6 lat 10%), a z kompostów 11–20% (średnio 14%) – tabela 2. Procentowy udział mobilnych frakcji manganu był nieco większy niż żelaza, z osadów wymyło 31–53%, średnio 40%, z kompostów 39–51%, średnio 46% (tab. 2). Świadczyć to może o większej mobilności manganu niż żelaza w osadach, co potwierdzają badania innych autorów [NOMEDA i in. 2008; WALTER i in. 2006]. WALTER i in. [2006] w swojej pracy stwierdzili, że kompostowanie osadów zmniejsza biodostępność Fe i Mn. Badania przeprowadzone przez NOMEDE i in. [2008] nie potwierdzają tej zależności. WYSOKIŃSKI i KALEMBASA [2009] zauważyli, że wapnowanie osadów (CaO) wpływa na zmniejszenie biodostępności obu pierwiastków.

## WNIOSKI

1. Osady ściekowe i komposty (osad ściekowy + trawa i trociny) miały znacznie większą niż gleba lekka (piasek gliniasty) ogólną zawartość żelaza, natomiast zawartość manganu (w osadach i kompostach) była zbliżona do zawartości w glebach.

2. W trakcie wieloletniego doświadczenia lizymetrycznego nie stwierdzono znaczących różnic między rodzajem dodatków (osadów ściekowych i kompostów) zastosowanych do nawożenia gleby lekkiej na zawartość ogólną żelaza i manganu.

3. Coroczne stosowanie osadów ściekowych i kompostów do gleby lekkiej przez okres 6 lat nie spowodowało znacznego zwiększenia zawartości badanych pierwiastków (Fe i Mn) w stosunku do gleby kontrolnej.

4. Udział mobilnych form żelaza w glebie, niezależnie od rodzaju nawożenia (osadu ściekowego, kompostu), nie wykazywał dużej zmienności w 6-letnim okresie badań. Utrzymywał się na poziomie 20% w odniesieniu do zawartości ogólnej. Udział mobilnych form manganu w badanych glebach był większy, rzędu 40–50%,

również nie stwierdzono znacznej zmienności w czasie udziału form mobilnych manganu w badanych glebach.

## BIBLIOGRAFIA

- BARAN A., KACORZYK P., JASIEWICZ Cz., KASPERCZYK M. 2011. Wymywanie pierwiastków śladowych z gleby w zależności od rodzaju nawożenia łąki górskiej [The leaching of trace elements from soils in relation to different fertilisation of a mountain meadow]. *Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie*. T. 11. Z. 1 (33) s. 11–20.
- BAUMAN-KASZUBSKA H., SIKORSKI M. 2008. Możliwości rolniczego i przyrodniczego wykorzystania osadów ściekowych na przykładzie wybranych obiektów [Possibilities of agricultural and natural use of sewage sludge for example of chosen objects]. *Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych*. Z. 526 s. 303–310.
- BAUMAN-KASZUBSKA H., SIKORSKI M. 2009. Selected problems of waste water disposal and sludge handling in the Mazovian Province. *Journal of Water and Land Development*. No 13b s. 149–159.
- BAUMAN-KASZUBSKA H., SIKORSKI M. 2011. Charakterystyka ilościowa i jakościowa osadów ściekowych pochodzących z małych oczyszczalni ścieków w powiecie plockim [The quality and quantity characteristic of sewage sludge coming from small sewage treatment plants on the area of Plock county]. *Inżynieria Ekologiczna*. Nr 25 s. 20–29.
- BAUZA-KASZEWSKA J., PALUSZAK Z., SKOWRON K. 2010. Wpływ kompostowania osadów ściekowych na liczebność wybranych grup drobnoustrojów autochtonicznych [The effect of sewage sludge composting on the density of selected groups of autochthonic thermophiles]. *Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie*. T. 10. Z. 2 (30) s. 19–27.
- BENEDYCKI S., GRZEGORCZYK S., GRABOWSKI K., PUCZYŃSKI J. 2001. Zawartość składników pokarmowych w runi mieszanek pastwiskowych [Content of the nutrients in sward of pasture mixtures]. *Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych*. Z. 479 s. 31–36.
- BRZEZIŃSKI M., SOSULSKI T. 2009. Wpływ wieloletniego nawożenia na zawartość ruchomych form manganu i żelaza w glebie lekkiej [The influence of long-term fertilization on the content of mobile forms of manganese and iron in the light soil]. *Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych*. Z. 541 s. 73–79.
- CZEKAŁA J. 2012. Wpływ wieloletniego stosowania osadów ściekowych na zawartość miedzi, cynku i manganu w roślinach [Effect of long-term application of sewage sludge on the content of copper, zinc and manganese in plant]. *Zeszyty Naukowe UP we Wrocławiu. Rolnictwo*. T. 53. Nr 589 s. 33–41.
- CZEKAŁA J., DACH J., WOLNA-MARUWKA A. 2006. Wykorzystanie bioreaktora do badań modelowych kompostowania osadu ściekowego [The use of a bioreactor for model studies on sewage sludge composting]. *Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie*. T. 6. Z. 2 (18) s. 29–40.
- CZEKAŁA J., SAWICKA A. 2006. Przetwarzanie osadu ściekowego z dodatkiem słomy i trocin na produkt bezpieczny dla środowiska [Processing of sewage sludge with added straw and sawdust into a product safe for the environment]. *Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie*. T. 6. Z. 2 (18) s. 41–50.
- CZYŻYK F., KOZDRAŚ M. 2004. Właściwości chemiczne i kompostowanie osadów z wiejskich oczyszczalni ścieków [Chemical properties and composting of sludge from rural wastewater treatment plant]. *Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie*. T. 4. Z. 2a (11) s. 559–569.
- DMOCHOWSKI D., GAJKOWSKA-STEFAŃSKA L., DMOCHOWSKA A., PRESNAROWICZ R.K. 2011. Ocena przydatności specjacji metali ciężkich w miejskich osadach pofermentacyjnych do produkcji trawników rolowanych [Application of heavy metals speciation in assessing suitability of muni-

- cipal post-fermentation sludge for producing roll-out grass [online]. Przegląd Naukowy – Inżynieria i Kształtowanie Środowiska. Nr 53 s. 207–216 [Dostęp 01.10.2016]. Dostępny w Internecie: [http://iks\\_pn.sggw.pl/z53/art5.pdf](http://iks_pn.sggw.pl/z53/art5.pdf)
- FALKOWSKI M., KUKULKA I., KOZŁOWSKI S. 2000. Właściwości chemiczne roślin łąkowych [Chemical properties of meadow plants]. Poznań. Wydaw. AR. ISBN 9788371602269 ss. 132.
- GONDEK K. 2009. Aspekty nawozowe i środowiskowe przemian i dostępności dla roślin wybranych pierwiastków w warunkach nawożenia różnymi materiałami organicznymi [The aspects of fertilizer and environmental changes and availability to plants of selected elements in the conditions of fertilization with various organic materials]. Zeszyty Naukowe UR w Krakowie. Ser. Rozprawy. Nr 452 ss. 146.
- GONDEK K., FILIPEK-MAZUR B. 2004. Zmiany zawartości rozpuszczalnych form żelaza i manganu oraz związków próchnicznych w osadzie ściekowym kompostowanym i wermikompostowanym [Changes in the content of soluble forms of iron, manganese and humus compounds in composted and vermicomposted sewage sludge]. Acta Agrophysica. Vol. 4. Nr 3 s. 677–686.
- GORLACH E. 1991. Zawartość pierwiastków śladowych w roślinach pastewnych jako miernik ich wartości [The content of trace elements in fodder plants, as matter of their value]. Zeszyty Naukowe AR w Krakowie. Z. 262 (34) s. 13–22.
- GUS 2015. Ochrona środowiska [Environment]. Warszawa. ISSN 0867-3217 ss. 565.
- HANEKLAUS S., KLASA A., HARMS H., NOWAK G., SCHNUG E. 1999a. Akumulacja żelaza, manganu, miedzi oraz cynku w roślinach i glebie w warunkach rolniczej utylizacji osadów ściekowych z północno-wschodniej Polski i wybranych aglomeracji miejskich. Cz. 1. Chemiczna charakterystyka osadów ściekowych i gleby [Accumulation of iron, manganese, copper and zinc in crops and soil in the conditions of agricultural utilization of sewage sludges originated from North-Eastern Poland and big Polish cities. P. 1. Chemical properties of sewage sludges and soil]. Inżynieria i Ochrona Środowiska. T. 2. Nr 2 s. 135–144.
- HANEKLAUS S., KLASA A., HARMS H., NOWAK G., SCHNUG E. 1999b. Akumulacja żelaza, manganu, miedzi oraz cynku w roślinach i glebie w warunkach rolniczej utylizacji osadów ściekowych z północno-wschodniej Polski i wybranych aglomeracji miejskich. Cz. 2. Akumulacja żelaza i manganu w roślinach [Accumulation of iron, manganese, copper and zinc in crops and soil in the conditions of agricultural utilization of sewage sludges originated from North-Eastern Poland and big Polish cities. P. 2. Accumulation of iron and manganese in crops]. Inżynieria i Ochrona Środowiska. T. 2. Nr 2 s. 145–152.
- JAKUBUS M. 2006. Ocena przydatności osadów ściekowych w nawożeniu roślin [The assessment of the usefulness of sewage sludge in plant fertilization]. Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie. T. 6. Z. 2 (18) s. 87–97.
- JAWORSKA H. 2012. Mangan całkowity oraz jego formy mobilne w wybranych glebach płowych z okolic Huty Miedzi Głogów [Total and mobile forms of manganese in the selected luvisols from the surroundings of Głogów copper works]. Proceedings of ECOpole. Nr 6(2) s. 731–736.
- KABATA-PENDIAS A., PENDIAS H. 1999. Biogeochemia pierwiastków śladowych [Biogeochemistry trace elements]. Warszawa. PWN. ISBN 8301128232 ss. 399.
- KALEMBASA D., PAKUŁA K., BECHER M. 2001. Sekwencyjnie wydzielone frakcje żelaza i manganu z gleb wzbogaconych w żelazo [Sequential fractionation of iron and manganese in soils with high iron content]. Roczniki Gleboznawcze. T. 52. Suplement s. 183–190.
- KARCZEWSKA A. 2002. Metale ciężkie w glebach zanieczyszczonych emisjami hut miedzi – formy i rozpuszczalność [Heavy metals in soils polluted by emissions from copper smelters – forms and solubility]. Zeszyty Naukowe Akademii Rolniczej we Wrocławiu. Rozprawy. ISSN 0867-7964 ss. 159.
- KARCZEWSKA A. 2004. Ocena znaczenia tlenków żelaza i manganu w sorpcji metali ciężkich w glebach zanieczyszczonych, w świetle ekstrakcji sekwencyjnej [Function on iron and manganese

- oxides in the sorption of heavy metals in polluted soils as related to the sequential extraction]. Roczniki Państwowego Zakładu Higieny. T. 55. Suplement s. 119–126.
- KARCZEWSKA A. 2008. Ochrona gleb i rekultywacja terenów zdegradowanych [Soil protection and reclamation of degraded areas]. Wrocław. Wydaw. UP. ISBN 9788377171134 ss. 390.
- KONCEWICZ-BARAN M., GONDEK K., KOROL J. 2014. Wpływ stosowania osadu ściekowego przetworzonego biologicznie i termicznie na zawartość manganu w roślinach i w glebie [Influence of biological and thermal transformed sewage sludge application on manganese content in plants and soil]. Inżynieria Ekologiczna. Nr 37 s. 17–30.
- MARTYN W., NIEMCZUK B. 2011. Zawartość żelaza i glinu w profilach gleb rdzawych różnie użytkowanych [Content of iron and aluminium in the profiles of variously utilized rusty soils]. Ochrona Środowiska i Zasobów Naturalnych. Nr 48 s. 287–296.
- NIEMIEC W., ZDEB M. 2013. Plantacja wierzby energetycznej nawożona osadami ściekowymi [Plantation of energetic willow fertilizing by municipal sewage sludge]. Journal of Civil Engineering, Environment and Architecture. T. 30. Z. 60 (1/13) s. 67–78.
- NOMEDA S., VALDAS P., CHEN S.Y., LIN J.G. 2008. Variations of metal distribution in sewage sludge composting. Waste Management. No. 28 s. 1637–1644.
- NOWOSIELSKI O. 1959. Dostępne formy manganu a potrzeby nawozowe [Available forms of manganese and fertilizing needs of soils]. Roczniki Gleboznawcze. T. 7 (1) s. 139–170.
- RAJMUND A., BOŻYM M. 2013. Ocena zawartości metali ciężkich w wiejskich osadach ściekowych i kompostach w aspekcie ich przyrodniczego wykorzystania [An assessment of the contents of heavy metals in sewage sludge from rural area and composts, in the aspect of their natural use]. Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie. T. 13. Z. 4(44) s. 103–113.
- RESZEL R., GŁOWACKA A. 2004. Wpływ wapnowanego osadu ściekowego oraz jego mieszanek z ziemią szałwiową i popiołem ze słomy na zawartość Fe i Mn w glebie lekkiej i kukurydzy [The influence of lime-treated sewage sludge and its mixtures with sugar-beet washing earth and straw ash on Fe and Mn contents in light soil and maize]. Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych. Z. 502 s. 967–972.
- ROGOŹ A. 2000. Wpływ odczynu gleby na zawartość i pobranie manganu przez kukurydzę i tytoń [The influence of soil pH on the content and uptake of manganese by maize and tobacco]. Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych. Z. 472 s. 587–596.
- SIKORSKI M., BAUMAN-KASZUBSKA H. 2008. Wybrane problemy gospodarki osadami ściekowymi na terenach wiejskich [Selected problems of sewage sludge management in rural areas]. Inżynieria i Ochrona Środowiska. Nr 11(3) s. 343–353.
- SUCHKOVA N., TSIRIPIDIS I., ALIFRAGKIS D., GANOULIS J., DARAKAS E., SAWIDIS TH. 2014. Assessment of phytoremediation potential of native plants during the reclamation of an area affected by sewage sludge. Ecological Engineering. No. 69 s. 160–169.
- SYKUT S., RUSZKOWSKA M., WOJCIESKA U., KUSIO M. 1998. Zawartość manganu w roślinach jako wskaźnik stopnia zakwaszenia gleby [Manganese content in plants as a test of soil acidification degree]. Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych. Z. 456 s. 233–236.
- SYMANOWICZ B., KALEMBASA S. 2009 Wpływ stosowania odpadowych materiałów organicznych i ich mieszanin na zmiany zawartości żelaza i molibdenu w glebie i życicy wielokwiatowej (*Lolium multiflorum* Lam.) [The influence of application on the waste organic materials and their mixtures on the changes of content iron and molybdenum in soil and Italian ryegrass (*Lolium multiflorum* Lam.)]. Ochrona Środowiska i Zasobów Naturalnych. Nr 40 s. 660–668.
- Uchwała nr 88 Rady Ministrów z dnia 1 lipca 2016 r. w sprawie „Krajowego planu gospodarki odpadami 2022”. MP 2016 poz. 784.
- WALTER I., MARTINEZ F., CALA V. 2006. Heavy metal speciation and phytotoxic effects of three representative sewage sludges for agricultural uses [online]. Environmental Pollution. No. 139

- s. 507–514. [Dostęp 28.09.2016]. Dostępny w Internecie: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0269749105003143>
- WANG C., LI X.C., MA H.T., QIAN J., ZHAI J.B. 2006. Distribution of extractable fractions of heavy metals in sludge during the wastewater treatment process [online]. *Journal of Hazardous Materials. A*. Vol. 137. Iss. 3 s. 1277–1283. [Dostęp 28.09.2016]. Dostępny w Internecie: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304389406004018>
- WYSOKIŃSKI A. 2011. Zawartość żelaza i manganu w roślinach nawożonych osadami ściekowymi kompostowanymi z CaO i popiołem z węgla brunatnego [The content of iron and manganese in plants fertilized with sewage sludge composted with CaO and brown coal ash]. *Ochrona Środowiska i Zasobów Naturalnych*. Nr 49 s. 108–116.
- WYSOKIŃSKI A., KALEMBASA S. 2009. Wpływ sposobu alkalizacji oraz kompostowania osadów ściekowych na zawartość glinu, manganu i litu w roślinach [online] [The influence of alkalizing and composting proces of sewage sludge on alluminium, lithium and manganese content in plants]. *Ochrona Środowiska i Zasobów Naturalnych*. Nr 41 s. 505–515. [Dostęp 01.10.2016]. Dostępny w Internecie: [http://www.ios.edu.pl/pol/pliki/nr41/nr41\\_58.pdf](http://www.ios.edu.pl/pol/pliki/nr41/nr41_58.pdf)

Agnieszka RAJMUND, Marta BOŻYM

**THE IRON AND MANGANESE CONTENT CHANGES  
IN LIGHT SOIL FERTILIZED WITH SEWAGE SLUDGE OR COMPOSTS  
DURING THE 6-YEARS LYSIMETER EXPERIMENT**

**Key words:** *compost, iron, light sandy soils, manganese, sewage sludge*

**S u m m a r y**

This scientific description covers iron (Fe) and manganese (Mn) content changes in light sandy soils fertilized with sewage sludge and composts, that was examined during long-term lysimeter experiment that took place in the years 2008–2013. The mobility of those elements using 1 M HCl was also measured. Sewage sludge and composts contained much more iron, than soils used in the lysimeter experiment, while the manganese content was at a similar level. Soils fertilized with sewage sludge and compost were slightly enriched in iron and manganese. The sludge, composts and soils contained mainly iron in immobile, while manganese in mobile forms. During the following years of lysimeter experiment, no significant changes in the mobility of both metals in soils were noticed.

**Adres do korespondencji:** mgr inż. Agnieszka Rajmund, Dolnośląski Ośrodek Badawczy ITP we Wrocławiu, ul. Berlinga 7, 51–209 Wrocław; tel. +48 71 367-80-92, e-mail: [a.rajmund@itp.edu.pl](mailto:a.rajmund@itp.edu.pl)