

**STUDIA I RAPORTY
IUNG-PIB**

48(2)

INNOWACJE W NAWOŻENIU

**PROGRAM WIELOLETNI
2016-2020**

**WSPIERANIE DZIAŁAŃ W ZAKRESIE OCHRONY
I RACJONALNEGO WYKORZYSTANIA
ROLNICZEJ PRZESTRZENI PRODUKCYJNEJ W POLSCE
ORAZ KSZTAŁTOWANIA JAKOŚCI SUROWCÓW ROŚLINNYCH**

Puławy 2016

INSTYTUT UPRAWY NAWOŻENIA I GLEBOZNAWSTWA
PAŃSTWOWY INSTYTUT BADAWCZY

Dyrektor: *prof. dr hab. Wiesław Oleszek*

Redakcja naukowa: *dr Tamara Jadczyshyn*
dr Agnieszka Rutkowska

Autorzy:

*dr Guillaume Debaene, dr Tamara Jadczyshyn, mgr Beata Jurga,
dr Kazimierz Kęsik, dr Anna Kocoń, prof. dr hab. Wojciech Lipiński,
dr Jacek Niedźwiecki, dr Piotr Ochal, prof. dr hab. Alicja Pecio,
dr Dorota Piłkuła, dr hab. Anna Podleśna, prof. nadzw.;
dr Agnieszka Rutkowska, dr Ryszard Winiarski*

Recenzenci:

*dr Tamara Jadczyshyn, dr Kazimierz Kęsik, dr Anna Kocoń,
dr hab. Mariusz Matyka, prof. nadzw.; dr Dorota Piłkuła,
dr Agnieszka Rutkowska, dr Grzegorz Siebielec*

Opracowanie redakcyjne i techniczne: *mgr Marzena Wydra-Ryś*

Okładka: krajobraz okolic Rogowa (fot. *dr Anna Nieróbca*)

ISBN 978-83-7562-222-5

Exemplarz bezpłatny

Nakład 300 egz., B5, zam. 38/H/16
Dział Upowszechniania i Wydawnictw IUNG-PIB w Puławach
tel. (81) 47 86 720; fax (81) 47 86 721
e-mail: iung@pulawy.pl; <http://www.iung.pulawy.pl>

INNOWACJE W NAWOŻENIU

SPIS TREŚCI

Wstęp	7
1. T. J a d c z y s z y n, W. L i p i ń s k i – Optymalizacja nawożenia azotem przy pomocy testu $N_{\min}$	9
2. B. J u r g a, R. W i n i a r s k i – Innowacje w zagospodarowaniu i stosowaniu nawozów naturalnych.....	19
3. P. O c h a ł – Innowacje na rynku nawozów wapniowych w Polsce	35
4. A. K o c o ń – Aktualne trendy i innowacje w dolistnym dokarmianiu roślin uprawnych	49
5. A. R u t k o w s k a – Biostymulatory w nowoczesnej uprawie roślin	65
6. D. P i k u ł a – Rola substancji humusowych oraz innowacyjne produkty zwiększające ich zawartość w glebie	81
7. K. K ę s i k – Zastosowanie metody Mehlich 3 w systemie doradztwa nawozowego.....	95
8. A. P e c i o, J. N i e d ź w i e c k i, G. D e b a e n e – Rozpoznanie pola podstawą precyzyjnego nawożenia roślin	105
9. A. P e c i o, J. N i e d ź w i e c k i – Ocena potrzeb nawożenia w rolnictwie precyzyjnym.....	131
10. A. P o d l e ś n a – Czynniki kształtujące wymywanie jonów siarczanowych z gleb uprawnych.....	155

Wstęp

Konkurencja na rynkach światowych oraz potrzeba ograniczenia presji rolnictwa na środowisko są impulsem dla ciągłego doskonalenia technologii produkcji roślinnej, których istotnym elementem jest nawożenie. Innowacje w nawożeniu nakierowane są na podniesie poziomu plonów i poprawę ich jakości oraz zwiększenie wykorzystania składników pokarmowych z nawozów, co skutkuje ograniczeniem strat biogenów z rolnictwa.

W monografii przedstawiono innowacje produktowe i procesowe wdrożone w ostatnim czasie lub mogące znaleźć zastosowanie w praktyce w niedalekiej przyszłości.

Jednym z najważniejszych czynników wpływających na produkcję rolniczą w Polsce jest zakwaszenie gleb, wynikające w dużej mierze z warunków klimatyczno-glebowych. W ostatnim czasie nastąpił duży postęp w technologii wytwarzania nawozów wapniowych. Granulacja zapewnia większy komfort stosowania i precyzję aplikacji. Wysoko reaktywne nawozy wapniowe dostępne w opakowaniach typu big-bag ułatwiają transport i przechowywanie. Ponadto, pojawiła się cała gama środków opartych na produktach odpadowych zawierających wapń, które mogą w niektórych przypadkach zastąpić tradycyjne wapno nawozowe.

Kwaśny odczyn gleby, przewaga gleb piaszczystych, uprawa roślin w monokulturach oraz spadek produkcji nawozów naturalnych nie sprzyjają akumulacji próchnicy w glebie oraz utrzymaniu jej na właściwym poziomie. Alternatywne dla obornika źródło substancji organicznej mogą stanowić produkty wytworzone na bazie substancji humusowych pozyskiwanych z torfu, węgla brunatnego czy leonardytyw. Stosowane systematycznie przez dłuższy czas wpływają korzystnie zarówno na właściwości fizykochemiczne gleby, jak również na plonowanie roślin oraz ich zdrowotność.

Koncentracja zwierząt w gospodarstwach specjalizujących się w chowie na skalę przemysłową stwarza poważne problemy z zagospodarowaniem ogromnych ilości odchodów zwierzęcych. Omówiono nowe, bardziej efektywne technologie aplikacji nawozów naturalnych oraz metody odzysku substancji (produkcja nawozów organicznych) i energii (produkcja biogazu) z odpadów pochodzenia zwierzęcego.

Postęp technologiczny w produkcji nawozów dolistnych związany jest przede wszystkim z wprowadzeniem nowych czynników chelatujących i kompleksujących zwiększających efektywność działania zawartych w nawozach składników pokarmowych. Na rynku pojawiła się również bardzo zróżnicowana grupa produktów, określanych jako biostymulatory, których działanie polega na zwiększeniu efektywności wykorzystania składników pokarmowych z nawozów, łagodzeniu skutków działania czynników stresowych oraz poprawie jakości plonu.

Innowacją w zakresie badań agrochemicznych jest wdrożenie w laboratoriach OSChR metody Mehlich 3, umożliwiającej równoczesną ekstrakcję wielu składników pokarmowych z gleby przy pomocy jednego roztworu, co pozwala na znaczne uproszczenie procedury analitycznej i obniżenie jej kosztów.

Nową jakością w praktycznym wykorzystaniu testu $N_{\min}$ jest prognozowanie zawartości azotu w glebie wiosną na podstawie wyniku analizy próbki pobranej jesienią lub zastosowanie komercyjnych zestawów do samodzielnego oznaczania stężenia jonów azotanowych.

Rozpoznanie zmienności gleby w granicach pola produkcyjnego i wyznaczenie obszarów o niesprzyjających warunkach dla plonowania roślin, daje możliwość aplikacji zróżnicowanych dawek nawozów, precyzyjnie dostosowanych do urodzajności gleby.

Kierownik zadania 1.6

dr Tamara Jadczyszyn

Kierownik zadania 2.2

dr Agnieszka Rutkowska

Tamara Jadczyszyn¹, Wojciech Lipiński²

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

² *Krajowa Stacja Chemiczno-Rolnicza w Warszawie*

OPTIMALIZACJA NAWOŻENIA AZOTEM PRZY POMOCY TESTU $N_{\min}$ *

Słowa kluczowe: nawożenie azotem, test glebowy, azot mineralny, zasobność gleby

Wprowadzenie

Azot jest składnikiem pokarmowym o najsilniejszym działaniu plonotwórczym (1, 12). W produkcji roślinnej jego głównym źródłem są obecnie nawozy mineralne. Nawożenie jest istotnym składnikiem kosztów, dlatego z punktu widzenia opłacalności produkcji duże znaczenie ma efektywne wykorzystanie składników nawozowych przez rośliny. Wysoka efektywność nawożenia azotem jest także bardzo ważna ze względów środowiskowych, bowiem niewykorzystany przez rośliny azot przyczynia się do eutrofizacji środowiska wodnego i jest źródłem emisji gazów do atmosfery (7). Podstawowym warunkiem dobrego wykorzystania składników pokarmowych przez rośliny jest prawidłowe dawkowanie nawozów (2). Powinny być one stosowane w takiej ilości, aby wraz z pulą składnika dostępnego w glebie pokryły potrzeby pokarmowe roślin. Formami azotu przyswajalnymi przez rośliny wyższe są jego związki mineralne, tj. azotany (NO_3^-) i jony amonowe (NH_4^+) (4). Stanowią one niewielki udział w ogólnej ilości azotu w glebie, bowiem dominują w niej związki organiczne (80-90%) oraz azot związany w biomasie mikroorganizmów glebowych (10-15%) (3, 6). Azot w glebie ulega ciągłym przemianom, w wyniku których związki organiczne ulegają mineralizacji, a związki mineralne są asymilowane przez mikroflorę glebową i rośliny wyższe.

Do oceny aktualnej zawartości azotu mineralnego w glebie stosuje się test $N_{\min}$ (5).

* Opracowanie wykonano w ramach zadania 1.6 w programie wieloletnim IUNG-PIB.

Ocena zasobności gleby w azot mineralny

Azotany jako związki dobrze rozpuszczalne w wodzie łatwo przemieszczają się w glebie w kierunku pionowym, dlatego ważne jest określenie ich zawartości nie tylko w warstwie ornej, ale także w głębszych warstwach profilu glebowego. Dla potrzeb doradztwa nawozowego najbardziej istotna jest ocena zawartości składnika w strefie zasięgu systemu korzeniowego roślin uprawnych, tj. do głębokości 60 cm. W celu oszacowania potencjalnego ryzyka dla wód, wynikającego z nadmiaru azotu w glebie, konieczna jest analiza profilu glebowego do głębokości 90 cm. W obu przypadkach istotne znaczenie ma sposób rozmieszczenia związków azotu, dlatego analizy wykonywane są w próbkach pobranych z poszczególnych warstw gleby: 0-30, 30-60 i 60-90 cm, ręcznie, przy pomocy lasek o różnej średnicy i długości (fot. 1) lub w sposób zautomatyzowany – przy pomocy próbników pneumatycznych, najczęściej pozycjonowanych przy pomocy GPS (fot. 2).



Fot. 1. Przykładowe laski glebowe do pobierania próbek do głębokości 90 cm

Źródło: Jadczyszyn T.

Analizy wykonywane są w świeżych próbkach. Do momentu rozpoczęcia analiz glebę przechowuje się w pojemnikach lub woreczkach zabezpieczających przed wysychaniem, w temp. 2-5°C (nie dłużej niż przez trzy dni).



Fot. 2. Pobieranie próbek glebowych przy pomocy próbnika pneumatycznego

Źródło: Ochal P.

Do celów doradztwa nawozowego próbki pobiera się wczesną wiosną, przed zastosowaniem nawozów. Zawartość jonów amonowych i azotanowych oznacza się po ich ekstrakcji 1% roztworem siarczanu potasu. Wyniki oznaczeń wyrażone w mg $N-NO_3$ i $N-NH_4$ na 1 kg suchej masy gleby, na potrzeby planowania nawożenia, przelicza się na $kg \cdot ha^{-1}$. W tym celu wynik z laboratorium (sumę $N-NO_3$ i $N-NH_4$) mnoży się przez współczynnik przeliczeniowy z tabeli 1, odpowiedni dla kategorii agronomicznej badanej gleby. Ze względów praktycznych zakłada się, że w całym profilu właściwości gleby odpowiadają właściwościom warstwy 0-30 cm i dlatego dla wszystkich warstw przyjmowany jest taki współczynnik przeliczeniowy, jaki odpowiada kategorii agronomicznej warstwy ornej gleby.

Tabela 1

Współczynniki do przeliczania zawartości N_{min} z $mg \cdot kg^{-1}$ gleby na $kg \cdot ha^{-1}$

Kategoria agronomiczna gleby	Współczynnik dla warstwy 0-30 cm warstwy gleby
Bardzo lekka	4,6
Lekka	4,5
Średnia	4,3
Ciężka	3,9

Źródło: Fotyma i in., 1998 (9)

Po zsumowaniu ilości azotu mineralnego w warstwach 0-60 lub 0-90 cm uzyskuje się ilość składnika dostępnego dla roślin w glebie na początku okresu wegetacji. Zestawienie uzyskanych wyników z wartościami z tabel 2 lub 3 (zależnie od tego do jakiej głębokości pobrano próbki glebowe) umożliwia ocenę aktualnych zasobów azotu w badanej glebie w okresie wiosennym.

Tabela 2

Ocena zasobności gleby w azot mineralny ($\text{N-NO}_3 + \text{N-NH}_4$) w warstwie 0-60 cm

Kategoria agronomiczna gleby	Zawartość $\text{N}_{\min}$ w warstwie 0-60 cm w kg/ha				
	bardzo niska	niska	średnia	wysoka	bardzo wysoka
Bardzo lekka	do 30	31-50	51-70	71-90	od 90
Lekka	do 40	41-60	61-80	81-100	od 100
Średnia, ciężka	do 50	51-70	71-90	91-100	od 100

Źródło: Fotyma i in., 1998 (9)

Tabela 3

Ocena zasobności gleby w azot mineralny ($\text{N-NO}_3 + \text{NH}_4$) w warstwie 0-90 cm

Kategoria agronomiczna gleby	Zawartość $\text{N}_{\min}$ w warstwie 0-90 cm w kg/ha				
	bardzo niska	niska	średnia	wysoka	bardzo wysoka
Bardzo lekka	<40	41-65	66-85	86-120	>120
Lekka	<50	51-80	81-105	106-130	>130
Średnia, ciężka	<60	61-70	91-115	116-140	>140

Źródło: Fotyma i in., 1998 (8)

Korekta nawożenia azotem w oparciu o test $\text{N}_{\min}$

Jeśli zasoby azotu w analizowanej glebie należą do przedziału zawartości średniej, to zaleca się przeciętne dla danego siedliska dawki nawozów azotowych, np. określone w oparciu o program doradztwa nawozowego lub tabelaryczne zalecenia nawozowe. W przypadku stwierdzenia niskiej lub bardzo niskiej zawartości składnika, w celu uzyskania zakładanych plonów roślin zaleca się bardziej intensywne nawożenie azotem. Wysoka lub bardzo wysoka zawartość $\text{N}_{\min}$ w glebie wskazuje, że dawki nawozów można zmniejszyć bez szkody dla plonowania roślin, a z korzyścią dla efektów ekonomicznych i środowiskowych.

Z powodu dużej dynamiki zmian różnych form azotu (organiczny ↔ mineralny) oraz zachodzących w okresie wegetacji zjawisk wymywania, przemieszczania czy

ulatniania, w stosunkowo krótkim czasie zasoby składnika w glebie mogą ulegać istotnym zmianom. Dlatego w polskim doradztwie nawozowym test N_{min} wykorzystuje się jako podstawę korekty dawki azotu określonej (*ex-ante*) za pomocą komputerowego systemu doradztwa nawozowego lub tabelarycznych zaleceń nawozowych (8).

Wynikającą z zaleceń dawkę azotu należy zmniejszyć lub zwiększyć, jeśli zasoby azotu mineralnego w glebie odbiegają od zawartości średniej. Wielkość korekty wyznacza się jako różnicę pomiędzy granicą przedziału zawartości średniej z tabeli 2 lub 3 i stwierdzoną w glebie zawartością N_{min} . Ujemna wartość różnicy wskazuje na możliwość zmniejszenia dawki N, a wartość dodatnia – na potrzebę jej zwiększenia.

Na przykład, jeśli test N_{min} wskazuje na obecność $120 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ w warstwie 0-60 cm gleby lekkiej, to zgodnie z tabelą 2, jest to o $40 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ powyżej przedziału zawartości średniej. Oznacza to, że zaplanowaną dawkę azotu należy zmniejszyć o $40 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$.

Korekta dotyczy na ogół pierwszej dawki azotu. Jeśli jednak wielkość dawki po korekcie jest zbyt mała do rozsiewu, można z niej zrezygnować lub dokonać odpowiedniego zwiększenia drugiej planowanej dawki nawozów. Decydują o tym względy techniczne, dotyczące możliwości wysiewu małych ilości nawozu, równomierności zastosowania lub nieskuteczności jego mieszania z innym nawozem.

W sytuacji gdy ilość N_{min} w glebie jest na tyle duża, że po uwzględnieniu korekty pierwszej dawki azotu uzyskuje się wartość ujemną, należy pominąć jej stosowanie. Skorygowaną całkowitą dawkę azotu należy zastosować w drugim zalecanym terminie.

Wykorzystanie jesiennego pomiaru N_{min} w doradztwie nawozowym

Ocena zawartości azotu mineralnego w glebie jesienią, po zbiorach roślin, jest wskaźnikiem potencjalnego zagrożenia wymywaniem składnika z profilu glebowego do wód gruntowych (10, 12). Azot pozostający w glebie, szczególnie w dolnych warstwach profilu (60-90 cm), jest narażony na wymywanie przez wody drenujące wertykalnie w okresie od jesieni do wczesnej wiosny. Na skutek wymywania pewnej ilości azotu, a także zachodzących procesów jego przemian, zawartość mineralnych form składnika w glebie jesienią jest zwykle większa niż wiosną. Straty w okresie jesienno-zimowym są zróżnicowane i zależą od wielu czynników, a głównie od: składu granulometrycznego gleby, jej pojemności wodnej, sumy opadów atmosferycznych. Próby dynamicznego modelowania procesów, z uwzględnieniem wszystkich wymienionych czynników, dotychczas nie przynoszą rozwiązań, które znalazłyby zastosowanie w praktyce rolniczej.

Analiza wyników kilkuletnich badań monitoringowych pozwoliła na ustalenie matematycznej zależności pomiędzy wynikami pomiaru N_{min} w glebie jesienią i wiosną. Dzięki temu wyznaczono współczynniki przeliczeniowe umożliwiające oszacowanie zawartości N_{min} w glebie wiosną na podstawie wyniku pomiaru jesiennego (tab. 4).

Tabela 4

Współczynniki do szacowania ilości azotu mineralnego w glebie wiosną

Kategoria agronomiczna gleby	Wartość współczynnika
Bardzo lekkie	0,6
Lekkie	0,7
Średnie i ciężkie	0,8

Źródło: opracowanie własne

Aby oszacować zawartość azotu mineralnego wiosną, należy wynik pomiaru jesiennego pomnożyć przez odpowiedni współczynnik z tabeli 4. Dalsze postępowanie w kierunku uściślenia dawki azotu jest takie samo jak opisano powyżej.

Szacowanie zasobów azotu wiosną, na podstawie wyników pomiarów wykonanych jesienią jest z pewnością obarczone pewnym błędem, ale stanowi rozwiązanie w sytuacjach, kiedy wykonanie analiz w okresie wiosny nie jest możliwe ze względów organizacyjnych. W uprawach ozimin pierwszą dawkę azotu stosuje się na początku ruszenia wegetacji roślin, gdy tylko możliwy jest wjazd maszynami rolniczymi na pole. W praktyce rolnicy starają się rozsiewać nawozy w momencie, gdy po nocnych przymrozkach gleba bywa jeszcze powierzchniowo zamarznięta i rozmarza w ciągu dnia. Głębsze warstwy gleby mogą być jeszcze wówczas zamarznięte, co uniemożliwia pobranie próbek w celu oznaczenia zawartości azotu mineralnego. Od momentu pobrania próbki do uzyskania wyników analiz z laboratorium mija na ogół kilka dni. Oczekiwanie na wynik testu mogłoby opóźniać wysiew nawozów, dlatego rolnicy często rezygnują z jego wykorzystania.

Korekta nawożenia na podstawie pomiaru zawartości azotu azotanowego w glebie

Rozwiązaniem logistycznych problemów utrudniających szersze stosowanie testu $N_{\min}$ w rolnictwie może być wykorzystanie komercyjnego zestawu do pomiaru stężenia jonów z zastosowaniem elektrod jonoselektywnych. Zestaw zawiera wszystkie materiały i odczynniki niezbędne do wykonania analizy oraz elektrodę jonoselektywną, umożliwiającą pomiar aktywności jonów azotanowych (fot. 3). Uzyskaną wartość przelicza się na stężenie azotanów w roztworze ekstrakcyjnym wg formuły podanej przez producenta w instrukcji wykonania analizy.

Dodatkowym sprzętem potrzebnym do pracy jest waga oraz wytrząsarka (próbka gleby z roztworem ekstrakcyjnym musi być wytrząsana przez ok. 30 min.).

W IUNG-PIB przeprowadzono prace porównawcze polegające na analizie próbek gleby metodą laboratoryjną i z wykorzystaniem zestawu Nitrat 2000.



Fot. 3. Zestaw do pomiaru aktywności jonów azotanowych w glebie

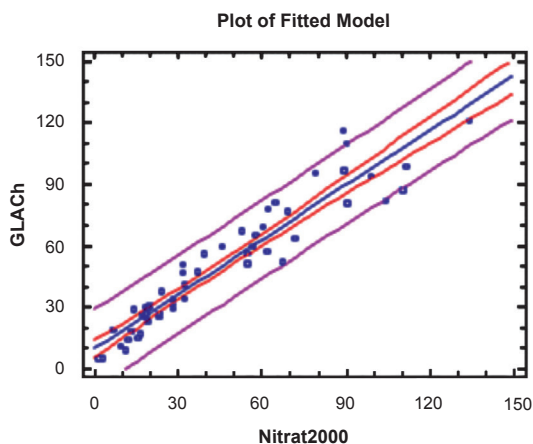
Źródło: Jadczyśzyn T.

Wyniki oznaczeń wykonanych obiema metodami były dobrze skorelowane (rys. 1). Współczynnik korelacji obu metod wynosił 0.953, a współczynnik determinacji 90.8%. Zależność opisano równaniem:

$$GLCh = 9.584 + 0.888 * \text{Nitrat 2000}$$

Pozwala to wnioskować, że ta „szybka” metoda oznaczania zawartości składnika może być wykorzystywana dla potrzeb doradztwa nawozowego. Podstawiając do powyższego równania wynik pomiaru uzyskany przy pomocy elektrody jonoselektywnej (Nitrat 2000), uzyskujemy wartość, jakiej należałoby oczekiwać, gdyby analiza wykonana została w laboratorium zgodnie z Polską Normą: PN-R-04028:1997 (11).

Wykorzystanie tak oszacowanej zawartości azotu azotanowego w glebie, dla potrzeb optymalizacji nawożenia azotem, jest możliwe, dzięki ocenie zasobów azotu azotanowego z wykorzystaniem przedziałów zawartości $N-NO_3$ w glebach z tabel 5 lub 6 (zależnie od głębokości poboru próbek).



Rys. 1. Zależność pomiędzy zawartością N-NO_3 oznaczoną „szybką” metodą (Nitrat 2000) i metodą laboratoryjną wg Polskiej Normy 04028:1997 (GLACh)

Źródło: Ochal P. (materiały niepublikowane)

Tabela 5

Ocena zasobności gleby w azot azotanowy (N-NO_3) w warstwie 0-60 cm

Kategoria agronomiczna gleby	Zawartość N-NO_3 w warstwie 0-60 cm w kg/ha				
	bardzo niska	niska	średnia	wysoka	bardzo wysoka
Bardzo lekka	do 12	13-20	21-31	32-49	od 50
Lekka	do 19	20-30	31-44	45-68	od 69
Średnia, ciężka	do 25	26-40	41-56	56-80	od 81

Źródło: opracowanie własne na podstawie Fotyma i in., 2010 (9)

Tabela 6

Ocena zasobności gleby w azot azotanowy (N-NO_3) w warstwie 0-90 cm

Kategoria agronomiczna gleby	Zawartość N-NO_3 w warstwie 0-60 cm w kg/ha				
	bardzo niska	niska	średnia	wysoka	bardzo wysoka
Bardzo lekka	do 17	18-28	29-44	45-69	od 70
Lekka	do 26	27-43	44-63	64-96	od 97
Średnia, ciężka	do 35	36-55	56-78	79-114	od 115

Źródło: opracowanie własne na podstawie Fotyma i in., 2010 (9)

Pełna ocena zasobów azotu mineralnego jest możliwa w przypadku zastosowania dodatkowej elektrody selektywnej w stosunku do jonów amonowych.

Wyposażenie doradców w tego rodzaju sprzęt umożliwia bardziej racjonalne gospodarowanie azotem. Jest to szczególnie ważne na obszarach zwiększonego ryzyka emisji azotu z rolnictwa do wód.

Literatura

1. Czarnocki Sz., Garwacka A., Starczewski J.: Architektura łanu i plonowanie wybranych odmian pszenicy jarej w zależności od zastosowanych technologii uprawy. *Fragm. Agron.*, 2009, **26(3)**: 34-41.
2. Czyżyk F.: Ocena zużycia nawozów mineralnych w gospodarstwach rolnych w aspekcie ochrony środowiska. *Problemy Inżynierii Rolniczej*, 2011, **19(3)**: 69-76.
3. Essington M. E.: Soil and water chemistry. An integrative approach. CRC Press LLC, USA, Boca Raton, 2004, ss. 534.
4. Fageria N. K.: The use of nutrients in crop plants. CRC Press Taylor & Francis Group, USA, Boca Raton, 2009, ss. 430.
5. Fotyma E.: Zasady nawożenia azotem z wykorzystaniem testów glebowych i roślinnych. *Nawozy i Nawożenie*, 2000, **3a**: 17-37
6. Handbook of soil sciences. Resource management and environmental impacts. Second edition. Red. Pan Ming Huang, Yuncong Li, Malcolm E Sumner. CRC Press Taylor & Francis Group, USA, Boca Raton, 2012, ss. 80.
7. Jadczyzyn T., Kopiński J.: Produkcyjne i środowiskowe aspekty nawożenia azotem. *Studia i Raporty IUNG-PIB*, 2013, **34(8)**: 27-45.
8. Jadczyzyn T., Kowalczyk J., Lipiński W.: Zalecenia nawozowe. Nawożenie mineralne na gruntach ornych i trwałych użytkach zielonych. Instrukcja upowszechnieniowa, nr 207, Puławy, 2015, ss. 24.
9. Fotyma E., Wilkos G., Pietruch Cz.: Test glebowy azotu mineralnego. Materiały szkoleniowe, IUNG, Puławy, 1998, **69/98**, ss. 48.
10. Fotyma M., Kęsik K., Pietruch Cz.: Azot mineralny w glebach jako wskaźnik potrzeb nawozowych roślin i stanu czystości wód glebowo-gruntowych. *Nawozy i Nawożenie*, 2010, **38**: 5-83.
11. PKN: PN-R-04028:1997. Analiza chemiczno-rolnicza gleby, pobieranie próbek i oznaczanie zawartości jonów azotowych i amonowych w glebach mineralnych.
12. Trawczyński C.: Ocena zawartości azotu mineralnego w glebie po zbiorze bulw ziemniaka. *Biul. IHAR*, 2013, **267**: 87-96.

Adres do korespondencji:

dr Tamara Jadczyzyn
Zakład Żywienia Roślin i Nawożenia
IUNG-PIB
ul. Czartoryskich 8
24-100 Puławy
tel.: 81 47 86 832
e-mail: tj@iung.pulawy.pl

Beata Jurga, Ryszard Winiarski

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

INNOWACJE W ZAGOSPODAROWANIU I STOSOWANIU
NAWOZÓW NATURALNYCH*

Słowa kluczowe: nawożenie wglębne, zakwaszanie gnojowicy, fermentowanie gnojowicy, kompostowanie

Wstęp

W Polsce za nawozy naturalne uważa się: obornik, gnojówkę i gnojowicę, pochodzące od zwierząt gospodarskich, z wyjątkiem odchodów pszczoł i zwierząt futerkowych, bez dodatków innych substancji oraz guano, przeznaczone do rolniczego wykorzystania (44). Obornik jest to nawóz składający się z odchodów (kału i moczu) zwierząt gospodarskich oraz ściółki. Gnojówka, powstająca w warunkach chowu zwierząt na płytkiej ściółce, jest to przefermentowany mocz z niewielką ilością kału, przenikający przez warstwę ściółki i gromadzony w specjalnych zbiornikach. Gnojowica jest płynnym nawozem powstającym w bezściółkowym systemie chowu w procesie fermentacji odchodów zwierząt z domieszką wody z mycia stanowisk i pojenia. Nawozy naturalne są tanim źródłem składników pokarmowych dla roślin oraz ważnym źródłem materii organicznej kształtującej żyzność gleby (23). Niemniej ich nieumiejętne przechowywanie i stosowanie – stwarza ryzyko emisji związków fosforu i azotu do wód i atmosfery. Wielkość emisji zależy m.in. od stosowanej dawki, sposobu i terminu stosowania nawozów (21).

Zasady przechowywania i stosowania nawozów naturalnych zawarte są w polskich aktach prawnych (39, 44). Ponadto, zgodnie z zaleceniem tzw. dyrektywy azotowej (5), w Polsce opracowany został Kodeks Dobrej Praktyki Rolniczej, który zawiera zbiór przyjaznych środowisku praktyk rolniczych oraz zasady aplikowania i przechowywania nawozów naturalnych. Ich przestrzeganie zapewnia zrównoważone gospodarowanie składnikami pokarmowymi pochodzącymi z nawozów naturalnych i mineralnych, tym samym ogranicza rozpraszanie składników poza ekosystem rolniczy.

* Opracowanie wykonano w ramach zadania 1.6 w programie wieloletnim IUNG-PIB.

W Polsce, według różnych źródeł, w ciągu roku powstaje od 100 do 112 mln ton nawozów naturalnych, które są źródłem znaczącej ilości azotu, fosforu i pozostałych składników (17, 20). W związku z przestawianiem produkcji zwierzęcej na system utrzymania bezściółkowego, zmniejsza się masa wytwarzanego obornika, natomiast wzrasta ilość gnojowicy (20). Coraz więcej gospodarstw rolnych z dużą obsadą zwierząt staje przed ogromnym wyzwaniem, jakim jest konieczność zagospodarowania płynnych nawozów naturalnych, zwłaszcza gnojowicy.

Celem pracy jest omówienie najważniejszych, dostępnych na rynku innowacyjnych technik stosowania, przetwarzania i zagospodarowania nawozów naturalnych lub ich nadwyżek, które nie mogą być natychmiast zastosowane na polu. Na potrzeby tej pracy przyjęto definicję innowacyjności według Organizacji Współpracy Gospodarczej i Rozwoju OECD, według której za innowacje uważa się „najróżniejsze (...) zjawiska o charakterze technicznym, organizacyjnym, społecznym (...), których efektem są nowe lub istotnie ulepszone (*new or significantly improved*) produkty i procesy”. Produkty, procesy i metody (techniczne, organizacyjne i marketingowe) są innowacjami, jeśli są nowe lub istotnie ulepszone, przynajmniej z punktu widzenia wdrażającego je regionu lub przedsiębiorstwa czy pojedynczego gospodarstwa (34).

Zakwaszanie gnojowicy

Sposób przechowywania i technika aplikacji nawozów naturalnych ma zasadniczy wpływ na wielkość strat składników nawozowych i ich skutki środowiskowe (23). Jednym z promowanych obecnie innowacyjnych rozwiązań, ograniczającym gazowe straty azotu, jest zakwaszanie gnojowicy. Dotychczas zabieg ten został z powodzeniem wdrożony do praktyki wyłącznie w Danii. Celem zakwaszania jest obniżenie pH do wartości 4,5-6,8 w zależności od rodzaju i składu gnojowicy (8), dzięki czemu można ograniczyć straty azotu w postaci jonów amonowych. Według różnych autorów, możliwe jest zredukowanie strat gazowych amoniaku o 40-60% (9). Zakwaszanie może odbywać się na różnych etapach – od wytworzenia do aplikacji (tj. w oborach, w kanałach odprowadzających gnojowicę, w zbiorniku magazynującym) lub w trakcie aplikacji na pola, co jest najbardziej pionierskim rozwiązaniem. Metodę łączącą zakwaszanie gnojowicy zarówno w oborze, kanałach, jak i w zbiorniku magazynującym opisuje Ka i (19). Nowa technika (opracowana i wprowadzona w Danii), polega na zakwaszaniu gnojowicy w specjalnym zbiorniku przez kontrolowane dodawanie kwasu siarkowego do momentu obniżenia pH do około 5,5. Zakwaszoną zawiesinę pompuje się z powrotem do budynków inwentarskich, prowadząc do obniżenia pH świeżych odchodów, krótko po ich wydaleniu. Proces ten powtarzany jest kilka razy dziennie w celu utrzymania pH gnojowicy w budynku na niskim poziomie. Zastosowanie tej metody umożliwia obniżenie emisji NH_3 z chlewni o 70% (19).

W procesie zakwaszania gnojowicy najczęściej stosuje się stężony kwas siarkowy ($96\% \text{H}_2\text{SO}_4$) (3, 18, 24, 33), choć wykorzystywane są również inne związki zakwaszające: kwas solny (6, 35), kwas azotowy (16), kwas mlekowy (1, 2), chlorek glinu (30, 40) sacharoza (1), siarka elementarna (25) czy superfosfat (42). Zakłada się, że zakwaszanie gnojowicy ogranicza straty gazowe azotu, zwiększa dostępność fosforu, a tym samym przyczynia się do wzrostu plonów. Jednak wyniki prowadzonych badań nie są jednoznaczne.

Jak dowodzi R o b o r e d o i i n . (37) stosowanie zakwaszonej gnojowicy świńskiej zwiększało w glebie ilość fosforu dostępnego dla roślin i nie powodowało jego uwsteczniania. Autorzy przypuszczają, że może być to związane z rozpuszczaniem nieorganicznych fosforanów, co powodowało większe stężenie mobilnych nieorganicznych związków fosforu w roztworze glebowym. Potencjalny wpływ zakwaszania gnojowicy na zwiększenie dostępności fosforu może być szczególnie istotny dla roślin wrażliwych na niedobór tego składnika, jak np. kukurydza. W badaniach wazonowych P e d e r s e n a (36) zastosowanie zakwaszonej (pH 5,9) gnojowicy świńskiej pod pszenicę ozimą spowodowało zwiększenie zawartości N w ziarnie średnio o 12,9% i przyrost plonów ziarna średnio o 7% w porównaniu do obiektu z surową gnojowicą świńską. Autor zaobserwował również większe plony suchej masy kukurydzy oraz lepsze pobranie składników pokarmowych w obiektach nawożonych zakwaszoną gnojowicą. P e d e r s e n (36) zaproponował więc, aby zakwaszoną gnojowicę bydłą traktować jako nawóz startowy pod kukurydzę. By zweryfikować ten kierunek wykorzystania zakwaszonej gnojowicy F a n g u i e r o (9) przeprowadził podobny eksperyment, nie obserwując jednakże istotnego wpływu zakwaszania gnojowicy na dostępność form fosforu.

Zakwaszanie modyfikuje również właściwości samej gnojowicy (tab. 1). Metoda ta budzi też pewne obawy co do wpływu zakwaszonej gnojowicy na aktywność mikrobiologiczną gleby, a także wpływu powtarzającej się aplikacji zakwaszonej gnojowicy na zawartość siarki i pH gleby. Aktualnie brakuje jednak obszernych badań w tym zakresie. Badania prowadzone przez F a n g u i e r o (10) wykazały, że stosowanie zakwaszonej gnojowicy (pH ok. 5) nie miało negatywnego wpływu na aktywność enzymatyczną gleby, w porównaniu z obiektem kontrolnym bez nawożenia, są to jednak wyniki pojedynczego doświadczenia, z których nie można wyciągnąć wniosków generalnych. Produkcyjne skutki zakwaszania gnojowicy nie są jednoznaczne, natomiast obawy budzi konieczność pracy ze stężonymi kwasami osób niewykwalifikowanych. W związku z tym dąży się do pełnej automatyzacji tego typu rozwiązań.

Tabela 1

Zmiany właściwości gnojowicy świńskiej zakwaszonej kwasem siarkowym (VI) do pH 5.5

Parametr	Próba kontrolna	Zakwaszona gnojowica
Sucha masa ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	91,0	83,0
Całkowity węgiel nieorganiczny ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ s.m.)	90,0	10,0
Fosfor całkowity ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ s.m.)	17,4	12,6
Fosfor przyswajalny ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ s.m.)	1,4	11,0
Siarka całkowita ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ s.m.)	6,4	53,0
Siarka przyswajalna ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ s.m.)	1,4	11,0
Magnez całkowity ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ s.m.)	9,2	7,5
Magnez przyswajalny ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ s.m.)	0,3	7,5
Wapń całkowity ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ s.m.)	25,7	20,3
Wapń przyswajalny ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ s.m.)	5,7	16,0

Źródło: Fanguiero i in., 2015 (9); zmodyfikowano na podstawie Hjorth i in., 2015 (15)

Separacja gnojowicy

Rozwiązaniem problemu zagospodarowania gnojowicy na obszarach o znacznej koncentracji ferm bezściółowych może być rozdzielanie gnojowicy na frakcję stałą (separat) bogatą w fosfor oraz frakcję płynną, która zawiera przede wszystkim azot i potas. Przyjmuje się, że w wyniku separacji 100 kg gnojowicy zwykle otrzymuje się 95 kg frakcji płynnej, zawierającej 1% suchej masy, 80% N, 20% P i prawie 100% K z całkowitej ilości zawartej w gnojowicy oraz 5 kg frakcji stałej zawierającej około 25-35% suchej masy, 20% N i 80% P (23). Frakcja stała może być zbywana jako nawóz organiczny do stosowania w oddalonych rejonach lub poddana kompostowaniu, natomiast frakcja płynna musi być zagospodarowana lokalnie. Istnieją różne technologie separacji, w tym flokulacja (kłaczkowanie), filtracja pasmowa, sedymentacja, flotacja, separacja przy użyciu wirówek, krat, sit, bębnow czy pras filtracyjnych (14, 26).

Sedymentacja gnojowicy to proces oparty na zjawisku swobodnego opadania zawiesiny ciała stałego w cieczy w wyniku działania sił ciężkości. Najczęściej prowadzona jest w osadnikach, zagęszczaczach lub wirówkach sedymentacyjnych (13). Frakcjonowanie gnojowicy tą techniką zarówno na drodze grawitacyjnej, jak i w wirówkach sedymentacyjnych jest odpowiednie dla cząstek, których średnica nie przekracza 1 mm (28). Proces filtracji ciśnieniowej stosuje się przede wszystkim do rozdzielenia na frakcję stałą i ciekłą zawiesin drobnoziarnistych, trudno odwadniających się, o charakterze mineralnym i organicznym (26). Elementami tej technologii

są prasy filtracyjne (komorowa, śrubowa, taśmowa) oraz filtry ciśnieniowe (4). W celu usprawnienia procesów separacji stosowane są podwyższone temperatury, rozcieńczenia, obróbka tlenowa oraz dodatki koagulantów i flokulantów. Koagulacja to proces polegający na łączeniu się cząstek fazy rozproszonej koloidu w większe agregaty tworzące fazę ciągłą o nieregularnej strukturze. Powszechnie stosowane związki usprawniające ten proces (koagulanty) to wielopierścieniowe kationy Ca^{2+} , Fe^{3+} , Al^{3+} , siarczan (VI) glinu (III) oraz chlorek żelaza (II) (32). Jako flokulanty, czyli związki, dzięki którym następuje łączenie się małych grup skoagulowanych cząsteczek w większe, osiadające kłaczkę, stosowane są najczęściej długołańcuchowe lub rozgałęzione polimery (26). Wybór techniki sedymentacji powinien być uzależniony od celu przeprowadzania separacji, wydajności, nakładu kapitału oraz kosztów eksploatacji.

Odseparowana, bezwonna frakcja stała (47) może być składowana w sposób uporządkowany na wysokiej przyzmie i może zostać rozprowadzona w każdej chwili bez konieczności ponoszenia dodatkowych nakładów na homogenizację. Może być stosowana jako nawóz organiczny (31) albo polepszacz gleby (46). Przykładową charakterystykę odseparowanej masy z gnojowicy prezentuje tabela 3. Separacja gnojowicy ogranicza emisję odorów, zmniejsza koszty magazynowania i transportu nawozu, dzięki zmniejszeniu jego objętości (12, 13), co ułatwia również ewentualne zagospodarowanie nawozu na cele energetyczne. Innym sposobem zagospodarowania separatu jest wykorzystanie do ścielenia legowisk po uprzedniej higienizacji wapnem. Zaletą takiego rozwiązania jest istotna oszczędność słomy. Jak podaje Wardal i Romaniuk (46), wydajność separatora 5-10 m³/h jest w stanie zabezpieczyć potrzeby na ściółkę fermy bydła o obsadzie około 250 krów. Wadą proponowanego rozwiązania jest wysoki koszt zakupu separatora oraz budowy instalacji – wraz z pompą, rurami i budową konstrukcji pod separator jest to wydatek rzędu od kilkudziesięciu do prawie 200 tys. złotych, w zależności od zastosowanego rozwiązania i wydajności (tab. 2).

Tabela 2

Przykładowe ceny separatorów

Przykładowe ceny separatorów						
Wydajność (m ³ /h)	4,5-18	4,0-50	4,0-50	6,0-72	4,0-22	4,0-42
Silnik (kW)	3	4	4	5,5	5,5	7,5
Cena brutto (tys. zł)	55	65	80	110	95	120

Źródło: Wardal i Romaniuk, 2016 (46)

Tabela 3

Przykładowa charakterystyka gnojowicy świeżej i po separacji

Charakterystyka		Przykryty zbiornik	Odkryty zbiornik
		gnojowica świńska	gnojowica mieszana (bydło + tuczniaki)
Surowa gnojowica	sucha masa (%)	5,6	7,6
	N (kg/m ³)	4,7	3,9
	P ₂ O ₅ (kg/m ³)	2,3	1,9
	K ₂ O (kg/m ³)	2,6	2,8
Charakterystyka odseparowanej masy z gnojowicy	sucha masa (%)	20*	20-40*
	N (kg/m ³)	6,4	4,8
	N _{org} (kg/m ³)	3,5	2,9
	P ₂ O ₅ (kg/m ³)	3,7	2,5
	K ₂ O (kg/m ³)	2,6	2,9

* w zależności od rodzaju separacji masy, zawartość suchej masy (%) może wynosić od 20% do 50%

Źródło: Wardal i Romaniuk, 2016 (46)

Fracja ciekła, bogata w azot i potas może być wykorzystana jako płynny nawóz aplikowany bezpośrednio do gleby za pomocą węży wleczonych lub iniekcji dogłębowej (27). Może być również poddana obróbce tlenowej lub dalszemu oczyszczaniu i po spełnieniu wymagań jakościowych dla wody przemysłowej, może być powtórnie spożytkowana w gospodarstwie, np. do mycia budynków inwentarskich czy zraszania pól w okresach wzmożonego zapotrzebowania na wodę (21). Frakcja ciekła gnojowicy nie rozwarstwia się i nie wymaga dodatkowego mieszania przed aplikacją. Jej objętość zostaje zredukowana o 15-30%, przez co zmniejsza się objętość magazynowa i liczba przejazdów transportowych. Ograniczone zostają straty azotu podczas magazynowania i aplikacji na skutek usunięcia ciał stałych i węgla. Wyraźnie zmniejsza się również uciążliwość zapachowa (26).

Kompostowanie

Innym sposobem zagospodarowania nadwyżek stałych nawozów naturalnych, obornika i frakcji stałej gnojowicy jest ich kompostowanie w gospodarstwie. Kompostowanie polega na mikrobiologicznym rozkładzie substratu organicznego w warunkach tlenowych. Podczas termofilnej fazy kompostowania temperatura wewnątrz pryzmy może osiągnąć 60-75°C, co powoduje higienizację substratu. Intensywność procesu zwiększa napowietrzenie pryzmy (najlepiej 2-, 3-krotne), przy użyciu specjalnych maszyn napowietrzających, tzw. aeratorów (22). Napowietrzanie

powoduje powstanie porowatej struktury, nagrzewanie się obornika, odparowanie nadmiaru wody, a następnie pasteryzację nawozu i uzyskanie kompostu o bardzo dużej wartości nawozowej. Zgodnie z obowiązującym w Polsce prawem, kompostowanie nie wymaga płyty betonowej, ponieważ napowietrzanie przyzmu powoduje szybki i znaczny spadek uwilgotnienia masy, redukując ryzyko wymywania w głąb profilu glebowego. Problem środowiskowy może zaistnieć, gdy występują długotrwałe opady przy obniżonej temperaturze, dlatego też kompostowanie powinno być przeprowadzane w warunkach słonecznej wiosny, lata lub wczesnej jesieni. Na lokalizację przyzmu należy przeznaczyć miejsce równe, bez zagłębień i znacznych pochyłości, z zachowaniem wymaganych odległości od domów mieszkalnych i innych obiektów.

Dojrzały kompost to nawóz organiczny, zawierający rozłożone resztki pochodzenia roślinnego, nawozy naturalne, ewentualnie osady ściekowe. Kompost, w którym procesy humifikacji zostały zakończone, stygnie i nabiera cech próchnicy. Jest lekko wilgotny, ma ciemną barwę, bezpostaciową formę i przyjemny zapach wilgotnej ziemi ogrodniczej. Zawartość składników pokarmowych w kompostach zależy od rodzaju użytych substratów i waha się w granicach: 0,75-1,5% N, 0,25-0,5% P₂O₅ i 0,5-1,0% K₂O. Przyjmuje się, że dawka 15 t kompostu odpowiada 30-35 t zwykłego obornika. Zatem z nawozowego punktu widzenia, znacznie bardziej uzasadnione jest kompostowanie obornika. Kompost, obok nawozów naturalnych, jest głównym nawozem stosowanym w rolnictwie ekologicznym. Jest tam pożądanym, kompletnym nawozem wieloskładnikowym, gdyż jest bogaty w substancję organiczną i zawiera niezbędne do życia roślin makro- i mikroelementy.

Granulowanie

Inną propozycją dla gospodarstw borykających się z problemem nadmiaru nawozów naturalnych może być ich suszenie i granulowanie (peletyzacja). Proces granulacji polega na ściskaniu, zlepianiu i formowaniu materiału, zwykle po uprzednim jego wysuszeniu (11) bądź zakwaszeniu (w przypadku gnojowicy) (27). Granulacja ułatwia wysiew i przechowywanie (nawóz nie zbryla się, a magazynowany w zacienionym i chłodnym miejscu, zachowuje pełnię swoich właściwości przez ok. 3 lata). Przy zachowaniu wszystkich pozytywnych cech tradycyjnego surowego obornika, obornik granulowany posiada czterokrotnie mniejszy ciężar i objętość, a co istotne dla potencjalnych nabywców – jest on pozbawiony nieprzyjemnego zapachu. Dzięki zmniejszeniu objętości i masy, granulowanie zdecydowanie ułatwia transport nawozów do miejsc, gdzie mogą być one bezpiecznie wykorzystane.

Obecnie na rynku dostępne są gotowe rozwiązania do granulacji nawozów, dedykowane nie tylko dużym fermom, ale też pojedynczym gospodarstwom. Zasadniczo takie systemy zawierają trzy podstawowe elementy:

- suszarnię, np. bębnową z wymiennikiem ciepła, gdzie suszony materiał znajduje się tylko w gorącym powietrzu, czy też suszarnie wykorzystujące nagrzane

powietrze z obór (jeśli substrat nie spełnia minimalnych kryteriów wilgotności dla danej suszarni, zaleca się wcześniej poddać surowiec odwodnieniu, wykorzystując wyciskacze mas gęstych lub wirówki dekantacyjne);

- zestaw ślimaków podających i odbierających materiał z suszarni;
- pelecierkę do produkcji peletu lub granulatu.

Według raportu opracowanego na zlecenie Komisji Europejskiej, obecnie w Europie granulowaniu podlega blisko 280 tys. ton nawozów naturalnych (11), niestety dane o wykorzystaniu tej techniki w Polsce nie są dostępne. Przetworzone nawozy naturalne mogą być zbywane w Polsce jako nawozy organiczne wyłącznie po uzyskaniu pozwolenia Ministra Rolnictwa i Rozwoju Wsi na wprowadzenie do obrotu.

Fermentacja metanowa gnojowicy

Kolejną metodą zagospodarowania nadwyżek gnojowicy jest fermentacja metanowa w biogazowniach rolniczych. Fermentacja metanowa jest kilkustopniowym procesem biologicznym, przebiegającym w wyniku działania określonego środowiska bakteryjnego. Podczas fermentacji metanowej odpady podlegają stabilizacji w wyniku usunięcia dużej ilości węgla. Jedynymi usuwanymi z systemu składnikami są wydzielające się gazy: CH_4 , CO_2 i H_2S , a cały azot konserwowany jest w formie organicznej lub amoniakalnej. Wyprodukowany w procesie fermentacji biogaz może być przetworzony na:

- energię elektryczną bezpośrednio włączaną do sieci przesyłowej lub wytworzoną w gazowych generatorach prądu;
- ciepło – w kotłach gazowych;
- energię elektryczną i ciepło – w układach do skojarzonego wytwarzania energii elektrycznej i ciepła (38).

Prawie wszystkie materiały organiczne nadają się do fermentacji, ale najbardziej znany jest proces fermentacji gnojowicy, ponieważ gnojowica, ze względu na swoje znaczne uwodnienie, zapewnia optymalne warunki do życia dla bakterii biorących udział w fermentacji (tab. 5). Ze względu na dobre właściwości fermentacyjne odchodów, inne odpady organiczne często są fermentowane właśnie z obornikiem czy gnojowicą. Takie połączenie substratów korzystnie wpływa na proces fermentacji i produkcję biogazu, znacząco wpływając na rentowność instalacji. Fermentacja materiałów organicznych bez użycia gnojowicy czy obornika jest możliwa, pod warunkiem, że substraty są właściwie skomponowane, jest jednak znacznie mniej popularna.

Wartość gnojowicy jako surowca do produkcji biogazu może się znacząco różnić w zależności od sposobu żywienia, gatunku zwierząt od którego pochodzi i ilości zużytej wody. Stopień rozkładu substratu organicznego zależy głównie od składu

surowca, obciążenia komory fermentacyjnej oraz temperatury. Substancje organiczne charakteryzują się różnym tempem rozkładu i wydajnością. W tabeli 4 przedstawione są dane dotyczące produkcji odchodów przez bydło, trzodę i drób oraz charakterystyczny dla nich potencjał produkcji biogazu.

Tabela 4

Właściwości odchodów zwierzęcych i wydajność produkcji biogazu

Parametr	Jednostka	Bydło		Trzoda chlewna		Drób	
		obornik	gnojowica	obornik	gnojowica	obornik	gnojowica
Sucha masa (s.m.)	t s.m./t	0,237	0,095	0,238	0,066	0,303	0,15
Sucha masa organiczna (s.m.o.)	t s.m.o./ t s.m.	0,764	0,774	0,799	0,761	0,727	0,756
s.m.o./DJP	kg s.m.o./ DJP/d	3-5,4 średnio 3,3		2,5-4 średnio 4,2		5,5-10 średnio 7,78	
Produkcja biogazu	m ³ /t s.m.o.	249,4	225,5	228,0	301,0	230,0	320,0
Produkcja biogazu	m ³ /DJP/d	1,5-2,9 średnio 2,2	0,56-1,5 średnio 1,03	0,6-1,25 średnio 0,93		3,5-4,0 średnio 3,75	

Źródło: Shulz i Eger, 2001 (40)

Tabela 5 prezentuje zaś charakterystykę stosowanych w procesie fermentacji nawozów naturalnych wraz z potencjałem produkcji biogazu.

Tabela 5

Charakterystyka wybranych substratów i ich potencjał produkcji biogazu

Nazwa substratu	% zawartości suchej masy w 1 t substratu	% zawartości suchej masy organicznej w zawartości suchej masy	Produkcja metanu z 1 t s.m.o.
	% wsadu	% s.m.o.	M3/t s.m.o.
Gnojowica bydlęca	9,5	77,4	222,5
Gnojowica świńska	6,6	76,1	301,0
Gnojowica kurza	15,1	75,6	320,0
Gnojowica krów mlecznych	8,5	85,5	154,0
Gnojówka	2,1	60,0	222,5

Źródło: EU Agrobiogas (7)

Duże znaczenie ma właściwe przygotowanie nawozu naturalnego (gnojowicy) do fermentacji. Przede wszystkim, okres wstępnego przygotowania przed załadowaniem do komory fermentacyjnej powinien być jak najkrótszy. Zbiorniki wstępnie magazynujące gnojowicę powinny mieć izolację cieplną, aby utrzymać substrat w odpowiedniej temperaturze zarówno zimą, jak i latem. Zbytne wychłodzenie, jak też utrzymywanie odchodów zwierzęcych w wysokiej temperaturze obniża ich wartość jako fermentowanego substratu. Bardzo duży wpływ na wydajność i produktywność procesu fermentacji mają także czynniki fizyczne (jak temperatura i mieszanie) oraz chemiczne (jak pH, potencjał redox oraz stosunek węgla do azotu). W klimacie europejskim najpopularniejsza jest fermentacja mezofilna, której zakres optimum termicznego wynosi 37-38°C, a zawartość komór jest mieszana kilka razy w ciągu doby, aby zapewnić jednorodność temperatury w całym zbiorniku, jak również zapobiegać tworzeniu się osadu i kożucha. Bakterie wywołujące fermentację metanową wymagają odczynu obojętnego, tj. pH ok. 7,0, albowiem poniżej pH 6,0 i powyżej pH 8,0 fermentacja szybko ustaje. Ponadto bakterie uczestniczące w fermentacji metanowej wymagają bardzo niskiego potencjału redox, rzędu 250 mV lub niższego, aby produkować metan. Potencjał ten tworzony jest przez pary: metan CH_4 i dwutlenek węgla CO_2 oraz proton H^+ i wodór H_2 . Populacja bakterii uczestniczących w fermentacji metanowej wymaga dostatecznej ilości pożywki, aby żyć i rozmnażać się. Z tego względu stosunek zawartości węgla do azotu, fosforu i siarki C/N/P/S, powinien wynosić odpowiednio 600:15:5:1, co wynika z zapotrzebowania mikroorganizmów na poszczególne składniki pokarmowe (45).

Przeprowadzone badania wykazują, że masa przefermentowana ma równorzędną wartość nawozową, jak np. obornik czy gnojowica. Ze względu na możliwe różnice jakościowe w otrzymanym pofermencie, przy ustalaniu dawek nawożenia najlepiej wykorzystywać wyniki analizy składu chemicznego pofermentu z konkretnej biogazowni, które wytwórca jest zobowiązany posiadać. Według wstępnych wyników badań IUNG-PIB (niepublikowane), poferment surowy zawiera przeciętnie ok. 0,5% azotu (czyli 5 kg N w 1 m³), 0,2% P_2O_5 i 0,4% K_2O . Płynna frakcja pofermentu po separacji zawiera ok. 0,3% N, 0,09% P_2O_5 i 0,3% K_2O zaś frakcja stała zawiera przeciętnie ok. 0,6% N, 0,6% P_2O_5 i 0,4% K_2O . Orientacyjne dawki pofermentu na gruntach ornych wynoszą zatem:

- dla pofermentu surowego – 30 m³ na 1 ha (na oziminach zaleca się podział całkowitej dawki: 15 m³ jesienią + 15 m³ wiosną);
- dla pofermentu płynnego po separacji – 60 m³ na 1 ha, również zaleca się dzielić dawkę (30 m³ + 30 m³), ale możliwe jest zastosowanie całej dawki pod uprawy jare, nie później jednak niż na 10-14 dni przed zasiewem;
- dla frakcji stałej – 30 t na 1 ha jesienią lub wiosną przedsięwzię.

Do głównych zalet stosowania pofermentu można zaliczyć zwiększenie zawartości materii organicznej, ograniczenie emisji metanu związanej ze składowaniem i stosowaniem nawozów naturalnych, a także ograniczenie emisji odorów.

Wykorzystanie jako dodatkowego substratu w biogazowniach odpadów z przemysłu rolno-spożywczego (np. wywaru gorzelnianego, odpadów z przetwórstwa mięsnego) czy odpadów zielonych umożliwia wykorzystanie w celach nawozowych cennych składników, a poprzez domknięcie obiegu składników nawozowych („odzysk”) również pośrednio ochronę zasobów surowców kopalnych.

Niewątpliwą zaletą pofermentu jest również to, że wydzielanie odorów zarówno podczas magazynowania w zbiornikach, jak i aplikacji na polu w zestawieniu ze składowaniem i stosowaniem nawozów naturalnych jest znacznie ograniczone (46). Nie bez znaczenia jest również dodatkowy aspekt higienizacyjny fermentacji metabolicznej, niemal całkowicie likwidujący mikroorganizmy chorobotwórcze.

Poferment może stać się źródłem problemów ekologicznych w przypadku jego nieprawidłowego przechowywania. Dlatego surowy poferment oraz płynną frakcję po separacji należy przechowywać w przykrytych gazoszczelną membraną lagunach lub w zamkniętych zbiornikach żelbetowych bądź stalowych. Frakcję stałą, uzyskaną po separacji pofermentu, należy magazynować na płycie kompostowej lub zbiorniku o szczelnym podłożu.

Nawożenie wglębne

Każda aplikacja nawozów musi być przeprowadzona w taki sposób, aby ograniczać ryzyko przedostania się cennych składników do wód. Zgodnie z polskim prawem, nawozy naturalne i organiczne w postaci płynnej stosuje się przy użyciu rozlewaczy, aplikatorów doglebowych, deszczowni lub wozów asenizacyjnych wyposażonych w płytki rozbryzgowe lub węże rozlewowe, zaś nawozy w postaci stałej standardowo stosuje się przy pomocy rozrzutników (39). Według UNECE (43), powierzchniowe rozlewanie pasowe nawozów naturalnych oraz iniekcja doglebowa to dwie rekomendowane techniki, które w największym stopniu ograniczają straty składników.

Pasowe rozlewanie gnojowicy i gnojówki zmniejsza emisję amoniaku z nawozów przez zmniejszenie oddziaływania powietrza atmosferycznego na nie. W systemie tym stosowane są dwa rozwiązania:

- Powierzchniowe rozlewanie pasowe z wykorzystaniem elastycznych węży wleczonych, które umożliwiają aplikację pogłówną między rzędami uprawianych roślin – zaleca się stosować na użytkach zielonych i na gruntach ornych do aplikacji gnojowicy w międzyrzędzia.
- Pasowa aplikacja powierzchniowa, w której gnojowica jest dozowana za pomocą stopy wleczonej lub redlicy z płozami (redlicy płozowej); w technice tej przy wężu rozprowadzającym znajduje się stopa lub płoza, dzięki którym wąż nie leży swobodnie, lecz rozlewa gnojowicę w dokładnych odstępach (nacinając niewielki rowek). Pod wpływem ciśnienia płozy tworzą niewielkie bruzdy i rozsuwają trawę, a gnojowica wydostaje się przez rynienkę. Aby dodatkowo zmniejszyć straty gazowe azotu, zaaplikowana gnojowica powinna być przykryta przez roślinność (zalecana wysokość trawy powinna wynosić

minimum 8 cm). Aplikator naglebowy łyżwowy wykorzystywany w tej technice, dzięki aplikowaniu gnojowicy bezpośrednio na powierzchni gruntu, pozwala również na ograniczenie nieprzyjemnego zapachu. Aplikatory tego typu zaleca się stosować głównie na pastwiskach (43).

Najbardziej skuteczną metodą ze względu na ograniczenie strat amoniaku w trakcie i po aplikacji jest bezpośrednie wprowadzenie gnojowicy lub gnojówki do gleby. Bezpośrednia aplikacja doglebowa zmniejsza emisję amoniaku, ograniczając kontakt nawozu z powietrzem i zwiększając jego przenikanie do gleby, dzięki bezpośredniemu umieszczeniu nawozu pod powierzchnią. W tym systemie mogą być stosowane wozy asenizacyjne, wyposażone w trzy podstawowe typy aplikatorów: szczelinowe, do iniekcji płytkiej oraz głębokiej.

Aplikatory szczelinowe, zwykle jako aplikatory tarczowe lub na bazie brony talerzowej wycinają wąskie szczeliny w glebie (zazwyczaj na głębokość 5-6 cm i w rozstawie 20-40 cm), do których jest rozlewana gnojówka lub gnojowica, bez przykrycia glebą. Ilość dozowanej gnojowicy musi być dokładnie określona, tak by nawóz nie wypływał na powierzchnię gleby. Technikę tę zaleca się stosować na użytkach zielonych, gruntach ornych oraz w zasiewach zbóż w fazie wczesnej wegetacji.

Aplikacja doglebowa może być wykonywana płytko (5-10 cm) lub głęboko (15-20 cm). Ta technika aplikacji nawozów, w przeciwieństwie do aplikatorów szczelinowych, umożliwia natychmiastowe przykrycie wstrzykniętej gnojowicy glebą przez zamontowane za rozdzielaczem gnojowicy koła naciskowe lub wał ugniatający. W aplikacji głębokiej wykorzystuje się m.in. aplikator talerzowy/tarczowy dwurzędowy (drugi rząd to talerze lub zgarniacze), w którym pierwszy rząd nacina w glebie rowek i aplikuje gnojowicę, a drugi rząd talerzy/zgarniaczy zasypuje rowek. Aplikatory do głębokiego zadawania gnojowicy zbudowane są na bazie kultywatorów lub bron talerzowych i przeznaczone są tylko do stosowania na gruntach ornych, ze względu na ryzyko uszkodzenia runi na użytkach zielonych. Ponadto, technika ta ma poważne ograniczenia w stosowaniu i nie jest zalecana m.in. na glebach płytkich, o zawartości frakcji pylastej powyżej 35% i równomiernie zdrenowanych, gdyż w pewnych warunkach mogą nastąpić znaczące straty azotu i fosforu na drodze szybszego wymywania, a azotu dodatkowo w postaci podtlenku N_2O (43).

Podsumowanie

Właściwe zarządzanie nawozami naturalnymi w gospodarstwach z dużą obsadą zwierząt lub wyspecjalizowanych fermach wielkoprzemysłowych może niekiedy narażać na pewnych trudności. Zgodnie z obowiązującym w Polsce prawem, w okresach dużego ryzyka wymycia składników do wód (gdy ustaje wegetacja) zabronione jest stosowanie nawozów naturalnych na polach. Niezbędnym wymo-

giem jest zatem posiadanie zbiorników na nawozy naturalne, o pojemności umożliwiającej gromadzenie wyprodukowanych nawozów w okresach, gdy ich stosowanie jest zabronione. Ponadto, należy pamiętać, że maksymalna dawka nawozów naturalnych, jaką rolnik może zastosować na pola to 170 kg N/ha/rok (44). Jeśli więc w gospodarstwie nie ma wystarczającego areálu gruntów by móc bezpiecznie wykorzystać nawozy naturalne bezpośrednio na polu, należy znaleźć odpowiednią technikę zagospodarowania lub przetwarzania nadwyżek. Według raportu opracowanego na zlecenie Komisji Europejskiej (11), w UE przetwarzanych jest 7,8% wytworzonych nawozów naturalnych, co odpowiada ilości 108 mln ton (108 Tg). Najwięcej nawozów naturalnych poddaje się przetworzeniu we Włoszech, Grecji i Niemczech – odpowiednio: 36,8, 34,6 oraz 14,8% nawozów naturalnych wytwarzanych w UE. W Polsce przetwarzanych jest 252 tys. ton, co stanowi zaledwie 0,3% całkowitej ilości nawozów wytwarzanych w UE. Obecnie na rynku dostępne są różnorodne rozwiązania uwzględniające zarówno rodzaj nawozu, niezbędne wymagania technologiczne, jak i potencjalne kierunki wykorzystania produktu finalnego. Zasadniczo wysiłki koncentrują się na uzyskaniu przynajmniej jednego z wymienionych efektów:

- umożliwienie racjonalnej gospodarki poszczególnymi składnikami nawozowymi (separacja gnojowicy, zakwaszanie gnojowicy);
- ułatwienie dalszej obróbki i ewentualnego transportu (separacja, kompostowanie, granulacja/peletyzacja);
- umożliwienie przetworzenia powstałej nadwyżki i jej wykorzystania na cele inne niż nawozowe (do ścielenia obór, odzysku wody czy produkcji energii w biogazowniach rolniczych).

W Polsce wciąż istnieje realna potrzeba promowania wśród rolników przedstawionych w pracy rozwiązań, tak by stały się one łatwiej dostępne i powszechnie wykorzystywane.

Literatura

1. Berg W., Pazsiczki I.: Mitigation of manure emission during manure storage. Int. Congr. Ser., 2006, **1293**: 213-216.
2. Berg W., Türk M., Hellebrand H.J.: Effects of Acidifying Liquid Cattle Manure with Nitric or Lactic Acid on Gaseous Emissions. Workshop on Agricultural Air Quality. Washington D.C USA, 2006, 492-498.
3. Biocover A/S, 2012. Vera Statement. http://www.veracert.eu/-/media/DS/Files/Downloads/Artikler/VERA/VERA_erklaering_2012_okt_enkeltside.pdf (Uzyskano 17.05.2016 r.).
4. Chastain J., Lucas W., Albrecht J., Pardue J.C., Adams J., Moore K.P.: Solids and nutrient removal from liquid swine waste using a screw press separator. Applied Engineering in Agriculture, 2001, **17(3)**: 355-363.
5. Dyrektywa Rady z dnia 12 grudnia 1991 r. dotycząca ochrony wód przed zanieczyszczeniami powodowanymi przez azotany pochodzenia rolniczego (91/676/EWG).

6. Eriksen J., Andersen A.J., Poulsen H.V., Adamsen A.P.S., Petersen S.O.: Sulfur turnover and emissions during storage of cattle slurry: effects of acidification and sulfur addition. *J. Environ. Qual.*, 2012, **41(5)**: 1633-1641.
7. EU Agrobiogas 2007-2010. Europejska inicjatywa instytucji badawczo-rozwojowych na rzecz zwiększania efektywności wykorzystania biogazu. Projekt 6 Programu ramowego Badań i Rozwoju Unii Europejskiej. <http://www.rtd-services.com/euagrobiogas/> (Uzyskano 20.05.2016 r.).
8. Fanguero D., Hjorth M., Gioelli F.: Acidification of animal slurry – a review. *J. Environ. Manag.*, 2015a, **149**: 46-56.
9. Fanguero D., Surgy S., Fraga I., Vasconcelos E., Coutinho J.: Acid treatment of animal slurries: potential and limitations. *Proceedings International Fertilizer Society*, 2015b, **775**: 10-13.
10. Fanguero D., Surgy S., Fraga I., Cabral F., Coutinho J.: Band application of treated cattle slurry as an alternative to slurry injection: Implications for gaseous emissions, soil quality, and plant growth. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2015, **211**: 102-11.
11. Foged H.L., Flotats X., Bonmati Blasi A., Palatsi J., Magri A., Schelde K.M.: Inventory of manure processing activities in Europe. Technical Report No. I concerning "Manure Processing Activities in Europe" to the European Commission, Directorate-General Environment, 1997, 10-130.
12. González-Fernández C., Nieto-Diez P.P., León-Cofreces C., García-Encina P.A.: Solids and nutrients removals from the liquid fraction of swine slurry through screening and flocculation treatment and influence of these processes on anaerobic biodegradability. *Bioresource Technology*, 2008, **99**: 6233-6239.
13. Hjorth M., Christensen K.V., Christensen M.L., Sommer S.G.: Solid-liquid separation of animal slurry in theory and practice. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 2010, **30**: 153-180.
14. Hjorth M., Christensen M.L., Christensen P.V.: Flocculation, coagulation and precipitation of manure affecting three separation techniques. *Bioresource Technology*, 2008, **99**: 8598-8604.
15. Hjorth M., Coccolo G., Jonassen K., Abildgaard L., Sommer S.G.: Continuous in-house acidification affecting animal slurry composition. *Biosystem Engineering*, 2015, **132**: 56-60.
16. Husted S., Jensen L.S., Jorgensen S.S.: Reducing ammonia loss from cattle slurry by the use of acidifying additives: the role of the buffer system. *J. Sci. Food Agric.*, 1991, **57**: 335-349.
17. Igras J., Kosiński J.: Zużycie nawozów mineralnych i naturalnych w układzie regionalnym. *Studia i Raporty IUNG-PIB*, Puławy, 2007, **5**: 107-117.
18. Jensen A.O.: Changing the environment in swine buildings using sulfuric acid. *Trans. ASAE*, 2002, **45(1)**: 223-227.
19. Kai P., Pedersen J.E., Jensen J.E., Hansen M.N., Sommer S.G.: A whole-farm assessment of the efficacy of slurry acidification in reducing ammonia emissions. *Eur. J. Agron.*, 2008, **28**: 148-154.
20. Kamiński E., Markiewicz W.: Technika nawożenia nawozami naturalnymi. Fałenty–Kłodzienko, 2014.

21. Konieczny K., Kwiecińska A., Gworek B.: The recovery of water from slurry produced in high density livestock farming with the use of membrane processes. *Separation and Purification Technology*, 2011, **80**: 490-498.
22. Krysztoforski M.: Sporządzanie kompostów i biopreparatów. Naturalne metody podtrzymywania żyzności gleby i ochrony roślin. Centrum Doradztwa Rolniczego w Brwinowie, Oddział w Radomiu, Radom, 2011, 4-11.
23. Krysztoforski M.: Zarządzanie obornikiem i gnojowicą. Nowoczesne techniki stosowania nawozów naturalnych. Prezentacja szkoleniowa kampanii Dobre Praktyki Rolnicze na Obszarach Szczególnie Narażonych na Azotany Pochodzenia Rolniczego, Tzw. OSN. Centrum Doradztwa Rolniczego w Brwinowie, Oddział w Radomiu, Radom, 2015, 4-11.
24. Kuligowski K., Tonderski A., Ziółkowski M., Skóra D.: Alternatywne, przyjazne środowisku technologie utylizacji nawozów odzwierzęcych. Seminarium „Ograniczenie oddziaływania biogenów z wielkoprzemysłowej produkcji zwierzęcej w Regionie Morza Bałtyckiego”, Warszawa, 06.12.2013.
25. Mahimairaja S., Bolan N.S., Hedley M.J., Macgregor A.N.: Losses and transformation of nitrogen during composting of poultry manure with different amendments: an incubation experiment. *Bioresource Technology*, 1994, **47**: 265-273.
26. Marszałek M., Kowalski Z., Makara A.: Rozdział gnojowicy na frakcje przy użyciu sedymentacji i filtracji ciśnieniowej. *Czasopismo Techniczne. Chemia*, 2012, **109(2)**: 125-134.
27. Memon B.V.: Method for preparing granular fertilizer from manure. Patent, sygnatura: US5118337* 04.20.1992 – 02.06.1992.
28. Møller H.B., Lund I., Sommer S.G.: Solid-liquid separation of livestock slurry: efficiency and cost. *Bioresource Technology*, 2000, **74**: 223-229.
29. Møller H.B., Sommer S.G., Ahring B.K.: Separation efficiency and particle size distribution in relation to manure type and storage conditions. *Bioresource Technology*, 2002, **85**: 189-196.
30. Nahm K.H.: Environmental effects of chemical additives used in poultry litter and swine manure. *Crit. Rev. Env. Sci. Tech.*, 2005, **35**: 487-513.
31. Ndegwa P.M., Hristov A.N., Arogo J., Sheffield R.E.: A review of ammonia emission mitigation techniques for concentrated animal feeding operations. *Biosyst. Eng.*, 2008, **100**: 453-469.
32. Ndegwa P.M., Zhu J., Luo A.: Effect of solid levels and chemicals additives on removal of solids and phosphorus in swine manure. *J. Environ. Eng.*, 2001, **127(12)**: 1111-1115.
33. Nyord T., Liu D., Eriksen J., Adamsen A.P.S.: Effect of acidification and soil injection of animal slurry on ammonia and odour emission. [In:] *Proceedings from the 15th RAMIRAN Conference, France, Versailles*, 2013.
34. OECD/Eurostat: Oslo Manual. Guidelines for Collecting and Interpreting Innovation Data, Third Edition, OECD/Eurostat, Paris, 2005.
35. Panetta D.M., Powers W.J., Lorimor J.C.: Management strategy impacts on ammonia volatilization from swine manure. *J. Environ. Qual.*, 2005, **34**: 1119-1130.
36. Pedersen J.B.: Oversight over landsforgøgene. Knowledge Centre for agriculture. Aarhus, Dania, 2012.

37. Roboredo M., Fangueiro D., Lage S., Coutinho J.: Phosphorus dynamics in soils amended with acidified pig slurry and derived solid fraction. *Geoderma*, 2012, **189**: 328-33.
 38. Romaniuk W., Łukaszuk M., Karbowy A.: Potencjalne możliwości rozwoju biogazowni w gospodarstwach rolnych w Polsce. *Problemy Inżynierii Rolniczej*, 2010, **4**: 129-139.
 39. Rozporządzenie Ministra Rolnictwa i Rozwoju Wsi z dnia 16 kwietnia 2008 r. w sprawie szczegółowego sposobu stosowania nawozów oraz prowadzenia szkoleń z zakresu ich stosowania. Dz.U.2014.393.
 40. Schulz H., Eder B.: *Biogas praxis: Grundlagen, Planung, Anlagenbau, Beispiele*. Fryburg, Okobuchverlag, 2001.
 41. Smith D.R., Moore Jr. P.A., Griffis C.L., Daniel T.C., Edwards D.R., Boothe D.L.: Effects of alum and aluminum chloride on phosphorus runoff from swine manure. *J. Environ. Qual.*, 2001, **30**: 992-998.
 42. Tran M.T., Vu T.K.V., Sommer S.G., Jensen L.S.: Nitrogen turnover and loss during storage of slurry and composting of solid manure under typical Vietnamese farming conditions. *J. Agric. Sci.*, 2011, **149**: 285-296.
 43. United Nations Economic Commission for Europe Framework Code for Good Agricultural Practice for Reducing Ammonia Emissions. UNECE, Geneva, 8-11 December 2014, 19-25.
 44. Ustawa z dnia 10 lipca 2007 r. o nawozach i nawożeniu (Dz. U. Nr 147 poz. 1033).
 45. Ward A.J., Hobbs P.J., Holliman P.J., Jones D.L.: Optimisation of the anaerobic digestion of agricultural resources. *Bioresource Technology*, 2008, **99**: 7928-7940.
 46. Wardal W.J., Romaniuk W.: Kierunki rozwoju technologii w chowie bydła mlecznego i innowacyjne sposoby zagospodarowania nawozu naturalnego. Szkolenie: „Praktyczne wykorzystanie wyników badań naukowych we wdrażaniu innowacji w produkcji zwierzęcej”. Centrum Doradztwa Rolniczego, Oddział w Radomiu, 25-26.04.2016 r.
 47. Zhang R., Westerman P.: Solid-liquid separation of animal manure for odour control and nutrient management. *Appl. Eng. Agric.*, 1997, **13**: 657-664.
-

Adres do korespondencji:

mgr Beata Jurga
Zakład Żywienia Roślin i Nawożenia
IUNG-PIB
ul. Czartoryskich 8
24-100 Puławy
tel. 81 47 86 839
e-mail: bjurga@iung.pulawy.pl

Piotr Ochal

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

INNOWACJE NA RYNKU NAWOZÓW WAPNIOWYCH W POLSCE*

Słowa kluczowe: nawozy wapniowe, nawozy wapniowo-magnezowe, surowce do produkcji nawozów wapniowych, wapno z produkcji ubocznej, wapno granulowane

Wstęp

Badania prowadzone przez okręgowe stacje chemiczno-rolnicze wskazują, że w Polsce ok. 40% gleb wykazuje odczyn bardzo kwaśny lub kwaśny, 34% – odczyn lekko kwaśny, a 26% – obojętny lub zasadowy (11). Specyfiką warunków rolnictwa w Polsce jest duży udział gleb lekkich, ulegających silnemu zakwaszeniu. Znaczne zakwaszenie gleb ma charakter przede wszystkim naturalny i wynika z procesu glebotwórczego oraz rodzaju skał macierzystych. Dodatkowo nakładają się na to antropogeniczne procesy zakwaszania i zbyt małe zużycie nawozów o działaniu odkwaszającym, głównie nawozów wapniowych i wapniowo-magnezowych (1, 4, 5, 6, 7, 10, 11, 14, 17). Jak wynika z badań Głównego Urzędu Statystycznego, w roku gospodarczym 2014/2015 wyniosło ono zaledwie 39,0 kg·ha⁻¹ CaO (11).

Podstawowym źródłem wapna dla celów rolniczych są złoża wapieni i margli, a także dolomitów i kredy. Powstały one najczęściej jako skały osadowe na dnie mórz, które zajmowały znaczne obszary na terenie naszego kraju w dawnych okresach geologicznych lub osadzały się w śródlądowych zbiornikach wodnych w czasach po ustąpieniu lodowca (2, 3). Z tych skał poprzez mielenie i przesiewanie wytwarza się nawozy wapniowe i wapniowo-magnezowe węglanowe. Produkcja nawozów w formie tlenkowej wymaga dodatkowo przeróbki termicznej, tj. wyprażenia kamienia wapiennego (2, 3, 6, 7, 9).

Oprócz nawozów wapniowych powstających w wyniku przerobu skał wapiennych w rolnictwie wykorzystuje się również wapno z produkcji ubocznej z różnych gałęzi przemysłu (2, 3, 7, 12, 13, 15). Nawozy te charakteryzują się zróżnicowaną zawartością tlenu wapnia (CaO) i wilgotnością. Decydując się na stosowanie

* Opracowanie wykonano w ramach zadania 2.2 w programie wieloletnim IUNG-PIB.

wapien z produkcji ubocznej, koniecznie trzeba zwrócić uwagę na zawartość szkodliwych pierwiastków, głównie kadmu i ołowiu.

Mówiąc o nawozach do odkwaszania gleb, w pierwszej kolejności mamy na myśli nawozy wapniowe wytwarzane z przerobu skał wapiennych, następnie produkty uboczne z różnych gałęzi przemysłu, które w swoim składzie zawierają znaczne ilości składnika odkwaszającego. Również jako produkty do odkwaszania gleb możemy stosować nawozy organiczno-mineralne oraz osady ściekowe, do których w procesie produkcji czy higienizacji dodano wapno. Najczęściej przy produkcji tych nawozów wykorzystuje się wapno palone lub gaszone (hydratyzowane) (15).

W ostatnich latach na rynku nawozów wapniowych wprowadzono innowację, polegającą na granulowaniu wcześniej rozdrobnionej kopaliny (13). Jest to bardzo dobre rozwiązanie dla producentów rolnych i dystrybutorów. Wapna nawozowe granulowane mogą być sprzedawane luzem w big-bagach czy w workach foliowych. Granulacja nawozów wapniowych zdecydowanie ułatwia wysiew ogólnie dostępnymi rozsiewaczami do nawozów, tzw. lejkami, dzięki czemu ograniczone jest pylenie nawozu w trakcie wysiewu. Jedynym minusem jest wyższa cena, na którą składają się koszty granulacji i pakowania nawozu.

Zasoby i wydobycie kopalin wykorzystywanych do produkcji nawozów wapniowych

Wapienie i margle

Podstawowym źródłem wapna nawozowego stosowanego w rolnictwie są skały wapienne. Wapienie o zawartości węglanu wapnia (CaCO_3) powyżej 90% są kopaliną wykorzystywaną jako główny surowiec w przemyśle wapienniczym. Odmiany spełniające dodatkowe kryteria (głównie chemiczne) znajdują zastosowanie w przemyśle: chemicznym, hutniczym (jako topnik hutniczy), cukrowniczym, do produkcji mączek wapiennych, w tym sorbentów do odsiarczania spalin. Wapienie margliste i margle są kopalinami przydatnymi wyłącznie w przemyśle cementowym. Zawartość CaCO_3 w tym przypadku może być znacznie niższa (poniżej 80%), niemniej jednak w bliskim sąsiedztwie pól od źródła surowca mogą one stanowić cenne źródło nawozów wapniowych (1, 7, 8, 9).

Surowce cementowo-wapiennicze występują dość powszechnie w różnych formacjach geologicznych, głównie w południowej i centralnej Polsce. Blisko 60% udokumentowanych zasobów stanowią utwory jurajskie. Duże znaczenie mają także wapienie dewońskie, triasowe i kredowe, natomiast podrzędne: prekambryjskie, kambryjskie, karbońskie i neogeńskie. Większość zasobów znajduje się w czterech regionach: świętokrzyskim, krakowsko-częstochowsko-wieluńskim, lubelskim i opolskim. W Polsce północnej wapienie jurajskie udokumentowano w obszarze Barcin-Piechcin koło Inowrocławia na Kujawach (1).

Geologiczne zasoby bilansowe omawianej grupy kopalin na koniec 2014 r. wyniosły ogółem 18 424,30 mln t, w tym 12 833,47 mln t (69,7%) obejmowało 70 złóż udokumentowanych dla przemysłu cementowego, a 5 590,83 mln t (30,3%) 120 złóż dla przemysłu wapienniczego. W 2014 r. wielkość geologicznych zasobów bilansowych wapieni dla przemysłu wapienniczego zmniejszyła się o 50,10 mln t. Zasoby geologiczne złóż zagospodarowanych (czynnych i eksploatowanych okresowo) stanowią 33,8% zasobów udokumentowanych dla przemysłu cementowego i odpowiednio 33,7% dla przemysłu wapienniczego (1).

Górnictwo skalne omawianych kopalin koncentruje się na obszarze trzech województw: świętokrzyskiego, którego udział wynosi 42,7% krajowego wydobycia wapieni i margli dla przemysłu cementowego i wapienniczego, opolskiego (udział 21,2%) oraz na terenie województwa kujawsko-pomorskiego o udziale 15,2%. Wydobycie obu omawianych kopalin w 2014 r. osiągnęło wielkość 41,36 mln t, co oznacza wzrost wydobycia o 2,28 mln t w stosunku do poprzedniego roku. W głównej mierze przyczynił się do tego wzrost wydobycia wapieni dla przemysłu cementowego (2,54 mln t), natomiast wydobycie surowca dla przemysłu wapienniczego zanotowało spadek (0,25 mln t) w porównaniu do roku poprzedniego. W przypadku wapieni i margli dla przemysłu wapienniczego, największą dynamiką spadku cechowała się eksploatacja na terenie województwa świętokrzyskiego (spadek o 5%), a nieznaczny wzrost wydobycia zanotowano jedynie na terenie województwa dolnośląskiego i opolskiego (1).

Kreda

Kreda jest to wapienna, miękka i porowata skała osadowa, cechująca się wysoką zawartością węglanu wapnia (CaCO_3) i bardzo drobnziarnistą strukturą. Znajduje zastosowanie m.in.: w przemyśle gumowym, papierniczym, chemicznym, farmaceutycznym, kosmetycznym, ceramicznym, cementowym, do produkcji farb i lakierów, tworzyw sztucznych, materiałów budowlanych, w rolnictwie jako kreda nawozowa do wapnowania gleb oraz w hodowli zwierząt jako kreda pastewna. Surowiec naturalny jest coraz częściej zastępowany przez mączki wapienne z przemiału wapieni i marmurów oraz przez surowiec uzyskiwany w procesie strącania z roztworów (1, 7).

Genetycznie, złoża kredy występujące w Polsce można podzielić na: złoża kredy piszącej i złoża kredy jeziornej (1).

Kreda pisząca jest organogenicznym osadem morskim o barwie białej lub kremowej, składającym się głównie ze szczątków organizmów planktonicznych: kokolitów i skorupki otwornic. W Polsce kreda pisząca występuje na Lubelszczyźnie w utworach okresu kredowego, a także na obszarze północno-wschodniej Polski, gdzie utwory kredowe występują w formie kier lodowcowych w obrębie utworów czwartorzędowych. Złoża kredy piszącej, udokumentowane w obrębie kier lodowcowych, licznie występują w rejonie Kornicy i Mielnika nad Bugiem na pograniczu województw: mazowieckiego i podlaskiego. Udokumentowano w tym rejonie kilkanaście złóż, z których 7 jest obecnie eksploatowanych (1).

Kreda jeziorna ma zazwyczaj barwę białą, białą-żółtą lub szarą i jest silnie wilgotną, mazistą masą. Powstaje w wyniku biochemicznego wytrącania i gromadzenia się osadu węglanowego na dnie jezior. Istotną rolę w procesie wytrącania węglanów odgrywają rośliny pobierające z wody rozpuszczony dwutlenek węgla CO_2 , powodując zmiany stopnia nasycenia roztworu i krystalizację kalcytu. Poza węglanami, osady jeziorne zawierają materię organiczną i materiał przyniesiony z łądu. Kreda jeziorna zawiera co najmniej 80% węglanu wapnia CaCO_3 , natomiast osad zawierający 50-80% jest określany jako gytia wapienna. Bardzo często pokłady kredy jeziornej i gytii zalegają pod pokładami torfów. Takie następstwo osadów wynika z wypłykania i stopniowego zarastania zbiornika sedymentacyjnego jakim jest jezioro. Złoża kredy jeziornej są zazwyczaj czwartorzędowe i występują w północnej i północnozachodniej Polsce. Znane są także nagromadzenia kredy trzeciorzędowej, wydobywanej jako kopalina towarzysząca ze złóż węgla brunatnego w rejonie Bełchatowa (1).

Wydobycie w 2014 roku wyniosło 145 tys. t i było niższe niż w 2013 roku o 11,3 tys. t, czyli 7,2%. Większość wydobywania stanowi kreda piaszczysta (prawie 127 tys. t – 87,4%), która jest wydobywana w 7 kopalniach (6 w województwie mazowieckim, 1 w województwie podlaskim). Pozostałą część wydobywania – 18 tys. t (12,6%), stanowi kreda jeziorna, która jest obecnie wydobywana tylko ze złoża Lubiatowo III (województwo zachodniopomorskie). Wydobycie kredy piaszczystej w stosunku do roku poprzedniego spadło minimalnie o 1,7 tys. t (1,3%), natomiast wydobycie kredy jeziornej było mniejsze o 9,6 tys. t (34,5%). Kreda jeziorna jest także okresowo pozyskiwana ze złóż węgla brunatnego w rejonie Bełchatowa.

Dolomity

Dolomity to skały osadowe węglanowe, w których skład wchodzi podwójne węglany wapnia i magnezu. Czysty minerał dolomit, o wzorze chemicznym $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ zawiera około 30,4% CaO , 21,7% MgO oraz 47,9% CO_2 . Czyste dolomity występują stosunkowo rzadko i zazwyczaj towarzyszą skałom wapiennym oraz zawierają różne domieszki (7). Dolomity mają zastosowanie w przemyśle hutniczym, szklarskim a także w budownictwie i drogownictwie. Otrzymywanie nawozów wapniowo-magnezowych zwykle stanowi produkcję uboczną. Wykorzystuje się do tego głównie drobne frakcje odpadów poprodukcyjnych. Złoża dolomitów występują na południu Polski w województwach: śląskim, dolnośląskim i małopolskim. Geologiczne zasoby bilansowe dolomitów w 2014 r. wyniosły 403,48 mln t i były większe w stosunku do roku wcześniejszego o 68,98 mln t. Geologiczne zasoby złóż eksploatowanych wyniosły 236,15 mln t, co stanowiło około 58,5% całości zasobów bilansowych dolomitu. Wydobycie dolomitów w 2014 r. wyniosło 3 131 tys. t i wzrosło o 296,9 tys. t w stosunku do 2013 r. (1).

Technologia produkcji nawozów wapniowych

Nawozy stosowane do odkwaszania gleb produkuje się na bazie surowców naturalnych, pozyskiwanych ze złóż zawierających minerały wapnia (kalcyt CaCO_3) lub wapnia i magnezu (dolomit $\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$). Surowcem do produkcji tych nawozów mogą być również produkty uboczne w różnych gałęziach przemysłu. Szczegółowe wymagania jakościowe dla typów wapna nawozowego znajdują się w Rozporządzeniu Ministra Gospodarki z dnia 8 września 2010 r. Dz. U. Nr 183, poz. 1229, załącznik nr 6. Nawozy wapniowe można też wprowadzać do obrotu na podstawie Rozporządzenia Komisji (UE) nr 463/2013 z dnia 17 maja 2013 r. (18, 19, 20).

W przypadku nawozów wapniowych wprowadzanych na rynek na podstawie Rozporządzenia Komisji (UE) 463/2013 z dnia 17.05.2013 r. (Dz.U.UE.L.2013.134.1) zmieniającego Rozporządzenie (WE) 2003/2003 Parlamentu Europejskiego i Rady w sprawie nawozów, w celu dostosowania jego załączników I, II i IV do postępu technicznego. W Rozporządzeniu UE, w rubryce dotyczącej minimalnej zawartości składników pokarmowych wprowadzono minimalną liczbę zubożnienia oraz inne do wymagań krajowych normy w stosunku do przesiewu, uwzględniające odsiew na mokro i sucho. W normach europejskich, w porównaniu do norm krajowych, brakuje informacji dotyczącej minimalnej procentowej zawartości składników nawozowych (CaO , $\text{CaO} + \text{MgO}$), które według wymogów unijnych deklaruje sam producent, łącznie z podaniem ich formy i rozpuszczalności (18, 23).

Pierwszym etapem produkcji wapna nawozowego jest dokładne rozdrobnienie skały wapiennej tak, aby spełniała minimalne wymagania normatywne dla nawozów wapniowych. Drugim etapem może być obróbka termiczna, która polega na wyprężaniu kamienia wapiennego lub w przypadku wapna magnezowego tlenkowego – prażeniu rozdrobnionego dolomitu (3). Do wapnowania wykorzystuje się również tzw. wapno gaszone, które powstaje w wyniku traktowania wodą wapna palonego (2, 6, 7, 9). Kolejny etap produkcji zależy od producenta, może on poddać surowiec granulacji, mieszać różne odmiany i typy wapna nawozowego, np. wapna tlenkowe i węglanowe (13).

Nawozy wapniowe granulowane

Od 2010 r. obserwuje się trend do wprowadzania na rynek granulowanych form zmielonego wcześniej wapna nawozowego, a także środków wapnujących uzyskiwanych w wyniku mieszania różnych odmian wapna nawozowego (13). Należy przy tym zaznaczyć, że proponowane przez producentów nowe formuły wapna o różnych wielkościach granul, spotykają się z aprobatą ze strony odbiorców. Główną zaletą nowych form wapna nawozowego jest to, że wapno takie daje się stosunkowo łatwo rozsiewać różnego typu rozsiewaczami. Ograniczone jest poza tym pylenie i przemieszczanie się drobnych cząstek wapna pod wpływem wiatru na sąsiednie pola i tereny zabudowane. Zdaniem producentów wapna, stosunkowo nietrwałe granule

łatwo rozpadają się pod wpływem wilgoci w glebie i praktycznie nie ograniczają aktywności chemicznej wapna. Proces granulacji nie może jednak ukrywać niedokładności rozmiaru obowiązujących dla określonych odmian wapna. W myśl rozporządzenia Ministra Gospodarki z dnia 8 września 2010 r. (Dz. U. Nr 183 poz. 1229) dla znacznej ilości odmian wapna nawozowego (wszystkie odmiany wapna zawierającego magnez i odmiany 01, 02, 03, 04, 05 wapna niezawierającego magnezu) wymagany jest odsiew na sicie o boku oczek 2 mm – na poziomie nie większym niż 10 lub 25% całkowitej masy nawozu, ponadto dla odmian wapna zawierającego magnez 03, 04, 05, 06, 07 i dla odmian 04, 05 wapna niezawierającego magnezu wymagany jest przesiew przez sito o boku oczek 0,5 mm, na poziomie co najmniej 50% całkowitej ilości wapna (19). Po zgranulowaniu odmiany wapna nie dają się zidentyfikować na podstawie zwykłej analizy sitowej („na sucho”), nie jest możliwe także ustalenie tą metodą analityczną wyjściowego składu ziarnowego badanego nawozu, dlatego wymagane w tym przypadku jest zastosowanie analizy sitowej „na mokro” (13).

Również w Rozporządzeniu Unijnym dopuszcza się granulację zmielonych surowców wapiennych, niemniej jednak po oznaczeniu uziarnienia na mokro muszą one spełniać parametry przesiewu jak wapna sypkie. Rozporządzenie to pozwala na wprowadzanie do obrotu mieszanek środków wapnujących z innymi typami nawozów WE (sekcja G5 rozporządzenia). Produkty takie możemy uzyskiwać przez mieszanie, prasowanie lub granulowanie środków wapnujących wymienionych w sekcjach od G.1 do G.4 z typami nawozów wymienionych w sekcjach A, B lub D. Zabrania się mieszania siarczanu amonu lub mocznika z wapnem tlenkowym lub wodorotlenkowym wymienionym w sekcji G.2. Niedozwolone jest także mieszanie, a następnie prasowanie lub granulowanie superfosfatów typów A.2.2 a), b) lub c) z dowolnymi typami wapna opisanymi w sekcjach od G.1 do G.4. Minimalne wymagania dla takich typów nawozów wynoszą:

- liczba zobojętniania 15%;
- 3% N w przypadku mieszanek zawierających typy nawozów o minimalnej zawartości N;
- 3% P_2O_5 w przypadku mieszanek zawierających typy nawozów o minimalnej zawartości P_2O_5 ;
- 3% K_2O w przypadku mieszanek zawierających typy nawozów o minimalnej zawartości K_2O . Potas w przeliczeniu na K_2O rozpuszczalny w wodzie (18). Koniecznie trzeba zadeklarować wapń całkowity, magnez całkowity jeśli jego zawartość jest równa lub większa niż 3% MgO. Jeżeli zawartość chlorku nie przekracza 2% Cl, można dodać informację „niska zawartość chlorków” (18).

Do potwierdzenia wymagań stawianych nawozom wapniowym wprowadzanym na rynek oraz stwierdzenia zgodności z typem są upoważnione laboratoria akredytowane zamieszczone w obwieszczeniu Ministra Gospodarki z dnia 28 kwietnia 2014 r. w sprawie listy akredytowanych laboratoriów upoważnionych do wykonywania badań potwierdzających spełnianie przez nawozy oznaczone znakiem „NAWÓZ WE” wymagań określonych dla tych nawozów w odrębnych przepisach (16).

Wapna z produkcji ubocznej i odpady zawierające wapń

Środki wapnujące pozyskuje się także jako produkty uboczne w wielu procesach przetwórczych, przemysłowych, w których niezbędnym składnikiem jest skała wapienna. Jest ona wykorzystywana m.in. w przemyśle cukrowniczym, celulozowym i siarkowym jako materiał do flotacji, a także w samym procesie produkcyjnym. Mogą one być wprowadzane do obrotu jako nawozy, jeśli spełniają kryteria określone w Rozporządzeniu Ministra Gospodarki i Pracy z dnia 8 września 2010 r. dotyczące:

- dopuszczalnych zawartości kadmu i ołowiu w wapnie nawozowym;
- kryterium minimalnej zawartości CaO;
- maksymalnego uwilgotnienia w zależności od odmiany i typu wapna;
- w niektórych przypadkach także stężenie chlorków i siarczków.

Poniżej scharakteryzowano kilka typów wapna pochodzących z produkcji ubocznej.

Wapno defekacyjne powstaje w procesie ekstrakcji cukru, w trakcie którego tzw. mleczko wapienne wiąże niecukrowe związki obecne w soku surowym. Wapno defekacyjne jest silnie uwodnione i w świeżej masie zawiera około 20% CaO. Obecnie wapno defekacyjne poddaje się procesowi suszenia do uzyskania 70% suchej masy i w takiej formie traktowany jest jako wapno nawozowe. W zależności od typu wapno defekacyjne może zawierać od 20 do 35% CaO w formie węglanowej oraz szereg związków mineralnych, składników pokarmowych, około 0,4-0,8% N, 0,9-1,8% P₂O₅, i 0,1-0,25% K₂O, plus dodatkowo mikroelementy (2, 7, 9).

Wapno pokarbidowe powstaje w procesie produkcji acetyleny jako produkt uboczny. Podczas wytwarzania acetyleny do karbidu dodawana jest woda, w wyniku czego uzyskuje się palny gaz wodorotlenek wapna, zwany wapnem pokarbidowym. Produkt ten zawiera około 30-35% CaO w formie wodorotlenku wapnia (2, 7, 9).

Wapno pocelulozowe powstaje jako produkt uboczny w produkcji papieru. Zawiera do 40% CaO w formie węglanowej. Wapno nawozowe pocelulozowe, aby mogło być stosowane w rolnictwie, nie może zawierać więcej niż 3,5% chlorków i 1,5% siarczków (2, 7, 9).

Wapno posodowe otrzymywane jest w procesie produkcji sody. W zależności od typu może zawierać od 20 do 35% CaO w formie węglanu wapnia. Wapno to, aby mogło być stosowane w rolnictwie, musi spełniać wymagania co do maksymalnej zawartości chlorków dla wapna posodowego suchego – najwyżej 2,5%, wapno posodowe odsączone i podsuszone – 3% (2, 7, 9).

Wapno posiarkowe jest produktem ubocznym po flotacji siarki i zawiera około 30% CaO w formie węglanowej i może zawierać maksymalnie 1,5% siarczków (2, 7, 9).

Środki wapnujące, które nie spełniają kryteriów dla typów wapna nawozowego można wprowadzić do obrotu po uzyskaniu pozwolenia Ministra Rolnictwa i Rozwoju Wsi. Minister wydaje pozwolenie, jeśli produkt uzyskał pozytywną opinię Instytutu Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa – PIB w Puławach, dotyczącą jego jakości i przydatności do stosowania. Podstawą opracowania opinii są wyniki badań właściwości fizykochemicznych i chemicznych wykonanych w akredytowanym laboratorium (13).

Odpady zawierające wapń

W przypadku stosowania produktów ubocznych zawierających wapń, jeśli nie są spełnione wymagania dla odpowiedniej odmiany wapna nawozowego, produkt uboczny jest traktowany jako odpad. Wytwórcę odpadu obowiązują wówczas przepisy o odpadach. Wapno z produkcji ubocznej, które nie spełnia któregośkolwiek kryterium dla typu wapna nawozowego, może być stosowane do odkwaszania gleb jako odpad na mocy Rozporządzenia Ministra Środowiska w sprawie procesu odzysku R10. Producent nie może wówczas wprowadzać takiego odpadu do obrotu handlowego, może natomiast zbywać go lokalnie po uzyskaniu stosownego zezwolenia, określonego w przywołanym rozporządzeniu. Na nim ciąży także wykonanie analiz gleby i odpadu. W załączniku do rozporządzenia wyszczególnione są następujące rodzaje odpadów dopuszczonych do takiego odzysku (tab. 1); (21).

Tabela 1

Odpady zawierające wapń

Kod odpadu	Rodzaj odpadu
02 04 02	Nienormatywny węglan wapnia oraz kreda cukrownicza (wapno defekacyjne)
03 03 09	Odpady szlamu wapiennego (pokaustyzacyjnego)
ex 06 01 99	Odpad z produkcji siarczanu magnezu nawozowego
ex 06 02 99	Odpady węglanu wapnia i odpady z gaszenia wapna palonego
ex 06 03 99	Odpady z fizykochemicznej obróbki kamienia wapiennego – z przesiewu i przepału kamienia wapiennego
06 09 04	Poreakcyjne odpady związków wapnia, inne niż wymienione w 06 09 03 i 06 09 80
ex 06 09 99	Odpad z produkcji roztworu ortofosforanów z ekstrakcyjnego kwasu fosforowego
ex 06 10 99	Odpady z produkcji soli azotanowych: saletra wapniowa i magnezowa
07 01 80	Wapno pokarbidowe niezawierające substancji niebezpiecznych (inne niż wymienione w 07 01 08)
10 13 04	Odpady z produkcji wapna palonego i hydratyzowanego
ex 19 02 99	Odpady zawierające węglan wapnia pochodzące z oczyszczania solanki
19 09 03	Osady z dekarbonizacji wody

Źródło: Rozporządzenie... (21)

W procesie odzysku wymienionych odpadów metodą rozprowadzania na powierzchni ziemi, w celu poprawy jej właściwości, musi być spełniony szereg warunków. Odpad, jak i gleba, na której będzie zastosowany, muszą być przebadane pod względem zawartości metali ciężkich przez akredytowane laboratorium. Dawkę odpadu określa się w taki sposób, aby zastosowanie odpadu poprawiło właściwości gleby, a jednocześnie nie przyczyniło się do jej zanieczyszczenia metalami ciężkimi. Odpady stosowane do odkwaszania gleby muszą spełniać wymagania odnośnie dopuszczalnego stężenia ołowiu i kadmu, takie jak dla wapna nawozowego. Odpad można stosować na gleby kwaśne i bardzo kwaśne o pH poniżej 5,5.

Osady ściekowe zawierające wapń

Osady ściekowe higienizowane wapnem charakteryzują się wysoką zawartością tlenu wapnia CaO, która wynosi zazwyczaj 30% w suchej masie. Osady takie powinny być stosowane podobnie jak nawozy wapniowe, czyli do odkwaszania gleb. Podstawowym ograniczeniem jest możliwość stosowania osadów na glebach o pH powyżej 5,6, w związku z czym osady te można stosować tylko na glebach kategorii agronomicznych średnich i ciężkich (12). Zalecane dawki wapna w tonach CaO na 1 ha na 4 lata podano w tabeli 2.

Tabela 2

Zalecane dawki wapna w tonach CaO na 1 ha na 4 lata

Gleba	Odczyn gleby pH		
	5,6-6,0	6,0-6,5	6,5-7,0
Średnia	1,7	1,0	-
Ciężka	3,0	2,0	1,0

Źródło: Jadczyzyn, 2010 (12)

Wapnowanie przeprowadza się średnio raz na 4 lata, więc osad jako źródło wapnia można wprowadzać w dawkach skomasowanych na 2 lub 3 lata. Rozporządzenie Ministra Środowiska określa maksymalną dawkę osadu w rolnictwie i do rekultywacji gruntów na cele rolnicze. Wynosi ona 3 Mg s.m.·ha⁻¹ na 1 rok, w dawkach skumulowanych 6 Mg s.m.·ha⁻¹ na 2 lata i 9 Mg s.m.·ha⁻¹ na 3 lata. Stosując osady, trzeba uwzględnić przede wszystkim zawartość wapnia, aktualne pH gleby, a także zawartość innych składników użytecznych, azotu, fosforu, a także szkodliwych metali ciężkich. Aby taki odpad mógł być zastosowany w rolnictwie, musi spełniać wymagania postawione w Rozporządzeniu Ministra Środowiska z dnia 6 lutego 2015 r., poz. 257, w sprawie komunalnych osadów ściekowych. Badania metodami referencyjnymi komunalnych osadów ściekowych obejmują ustalenie:

- 1) wartości pH;
- 2) zawartości s.m. – wyrażonej w procentach masy komunalnych osadów ściekowych;
- 3) zawartości substancji organicznej, azotu ogólnego, w tym azotu amonowego, fosforu ogólnego, wapnia i magnezu – wyrażonej w procentach s.m.;
- 4) zawartości metali ciężkich: ołowiu, kadmu, rtęci, niklu, cynku, miedzi i chromu – wyrażonej w mg/kg s.m.;
- 5) obecności bakterii chorobotwórczych z rodzaju *Salmonella* w 100 g osadu;
- 6) liczby żywych jaj pasożytów jelitowych *Ascaris* sp., *Trichuris* sp., *Toxocara* sp. w kg s.m.

Dopuszczalną zawartość metali ciężkich w komunalnych osadach ściekowych określono w załączniku nr 1 do rozporządzenia Ministra Środowiska z dnia 6 lutego 2015 r. (poz. 257); (tab. 3).

Tabela 3

Dopuszczalna zawartość metali ciężkich w komunalnych osadach ściekowych

Lp.	Metale	Zawartość metali ciężkich w mg/kg suchej masy osadów nie większa niż przy stosowaniu komunalnych osadów ściekowych		
		w rolnictwie oraz do rekultywacji gruntów na cele rolne	do rekultywacji terenów na cele nierolne	przy dostosowywaniu gruntów do określonych potrzeb wynikających z planów gospodarki odpadami, planów zagospodarowania przestrzennego lub decyzji o warunkach zabudowy i zagospodarowania terenu, do uprawy roślin przeznaczonych do produkcji kompostu, do uprawy roślin nieprzeznaczonych do spożycia i produkcji pasz
1.	Kadm (Cd)	20	25	50
2.	Miedź (Cu)	1000	1200	2000
3.	Nikiel (Ni)	300	400	500
4.	Ołów (Pb)	750	1000	1500
5.	Cynk (Zn)	2500	3500	5000
6.	Rtęć (Hg)	16	20	25
7.	Chrom (Cr)	500	1000	2500

Źródło: Rozporządzenie... (22)

Przed zastosowaniem osadów ściekowych trzeba koniecznie zbadać grunty, na których mają być stosowane, pod względem:

- 1) wartości pH;
- 2) zawartości fosforu przyswajalnego w przeliczeniu na P_2O_5 (pięciotlenek fosforu), jeżeli osad będzie stosowany w rolnictwie – wyrażonej w mg/100 g gleby;
- 3) zawartości metali ciężkich: ołowiu, kadmu, rtęci, niklu, cynku, miedzi i chromu – wyrażonej w mg/kg s.m.

Badania gruntów wykonuje się każdorazowo przed skierowaniem danej partii komunalnych osadów ściekowych do zastosowania na gruncie. W tabeli 4 przedstawiono wartości dopuszczalne ilości metali ciężkich w wierzchniej warstwie gruntu o głębokości 0-25 cm przy stosowaniu komunalnych osadów ściekowych do rekultywacji terenów na cele nierolne, przy dostosowywaniu gruntów do określonych potrzeb, wynikających z planów gospodarki odpadami, planów zagospodarowania przestrzennego lub decyzji o warunkach zabudowy i zagospodarowania terenu, do uprawy roślin przeznaczonych do produkcji kompostu oraz do uprawy roślin nieprzeznaczonych do spożycia i produkcji pasz.

Tabela 4

Dopuszczalne ilości metali ciężkich w wierzchniej warstwie gruntu

Lp.	Metale	Wartość dopuszczalna ilości metali ciężkich w mg/kg suchej masy gruntu nie większa niż na gruntach		
		lekkich	średnich	ciężkich
1.	Kadm (Cd)	3	4	5
2.	Miedź (Cu)	50	75	100
3.	Nikiel (Ni)	30	45	60
4.	Ołów (Pb)	50	75	100
5.	Cynk (Zn)	150	220	300
6.	Rtęć (Hg)	1	1,5	2
7.	Chrom (Cr)	100	150	200

Źródło: Rozporządzenie... (22)

Wapnowanie gleb rolniczych i nierolniczych przy stosowaniu stabilizowanych i odkaszanych alkalicznie – przy użyciu CaO lub $\text{Ca}(\text{OH})_2$ – komunalnych osadów ściekowych jest atrakcyjnym sposobem ich neutralizowania i odzysku (15).

Nawozy organiczno-mineralne zawierające wapń

Kolejną propozycją na rynku nawozów do odkwaszania gleb mogą być nawozy mineralno-organiczne o podwyższonej zawartości CaO. Niektóre rodzaje nawozów mineralno-organicznych mogą zawierać nawet 30% wapnia w przeliczeniu na CaO. Nawozy te zawierają w swoim składzie dodatkowo inne składniki pokarmowe, np. azot, fosfor, potas oraz substancję organiczną (co najmniej 20%). Decydując się na stosowanie takiego nawozu, trzeba postępować podobnie jak z wapnem nawozowym. Podstawą ustalenia dawki jest pH gleby i kategoria agronomiczna. Podczas ustalania dawek NPK należy wziąć pod uwagę zawartość makroskładników w nawozie.

Podsumowanie

Rynek polski dysponuje szerokim asortymentem nawozów wapniowych oferowanych dla rolnictwa. Najbardziej popularnymi są wapna węglanowe, dolomity pochodzące z przerobu skał wapiennych. Zazwyczaj nawozy te powstają jako produkty uboczne w wyniku rozkruszania skał i ewentualnie potem są mielone do uzyskania właściwych parametrów ustanowionych w odpowiednich aktach prawnych.

Zasoby kopalin wykorzystywanych do produkcji nawozów wapniowych w Polsce są bardzo duże, przekraczające zapotrzebowanie rolnictwa.

Od 2010 roku dosyć szybko rozwinął się rynek granulowanego wapna nawozowego. Na rynku dostępne są granulowane wapna węglanowe, dolomity, kredy czy wapna tlenkowe. Koniecznie trzeba pamiętać, że granulacja nie może ukrywać zbyt grubego przemiału, a oferowane produkty muszą spełniać normy przesiewu dla deklarowanej odmiany. Wprowadzenie nawozu w takiej formie zdecydowanie ułatwia wysiew, nawet tradycyjnymi rozsiewaczami nawozowymi. Ograniczone jest pylenie nawozu, dzięki czemu możemy wapnować przy wietrznej pogodzie bez obawy znoszenia nawozu na sąsiednie pola.

Alternatywą dla tradycyjnych nawozów wapniowych mogą być nawozy organiczno-mineralne, odpady, a także osady ściekowe zawierające w swoim składzie wapń. W przypadku stosowania odpadów i osadów koniecznie trzeba przestrzegać zasad bezpiecznego ich stosowania, zgodnie z obowiązującym prawem.

Literatura

1. Bilans zasobów złóż kopalin w Polsce wg stanu na 31 XII 2014 r. Państwowy Instytut Geologiczny – PIB, Warszawa, 2015, ss. 474.
2. Boguszeński W.: Wapnowanie gleb. PWRiL, Warszawa, 1980, ss. 176.
3. Filipek T., Badora A., Lipiński W., Brodowska M. S., Domańska J., Harasim P., Kozłowska-Strawska J., Skowron P., Skowrońska M., Tkaczyk P.: Zakwaszenie i wapnowanie gleb. Fundacja Programów Pomocy dla Rolnictwa FAPA, 2015, ss. 236.
4. Filipek T., Fotyma M., Lipiński W.: Stan, przyczyny i skutki zakwaszenia gleb ornych w Polsce. Nawozy i Nawożenie, 2006, **27**: 7-38.
5. Filipek T.: Przyrodnicze i antropogeniczne przyczyny oraz skutki zakwaszenia gleb. Nawozy i Nawożenie, 2001, **8**: 5-26.
6. Fotyma M., Mercik S.: Chemia rolna. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 1995, ss. 356.
7. Fotyma M., Zięba S.: Przyrodnicze i gospodarcze podstawy wapnowania gleb. PWRiL Warszawa, 1988, ss. 251.
8. Gientka M.: Zasoby i wydobycie kopalin wapniowych i wapniowo-magnezowych w Polsce. Nawozy i Nawożenie, 2006, **27**: 58-68.

9. Grzebisz W.: Nawożenie roślin uprawnych 2. Nawozy i Systemy Nawożenia, PWRiL, Poznań, 2009, ss. 376.
10. Grzebisz W., Diatta J. B., Szczepaniak W.: Produkcyjne i ekologiczne uwarunkowania wapnowania gleb gruntów ornych. Nawozy i Nawożenie, 2006, **27**: 69-85.
11. GUS: Środki produkcji w rolnictwie. 2015, ss. 43.
12. Jadczyzyn T.: Stosowanie osadów ściekowych w rolnictwie. Instrukcja upowszechnieniowa. IUNG-PIB, Puławy, 2010, **175**: 1-16.
13. Kęsik K., Jadczyzyn T.: Wprowadzanie do obrotu środków wapnujących i nawozów mineralnych zawierających wapń. IUNG-PIB, Puławy, 2012, ss. 27.
14. Lipiński W.: Odczyn gleb Polski. Nawozy i Nawożenie, 2005, **23**: 33-4.
15. Marcinkowski T. A.: Przetwarzanie osadów ściekowych w procesie wapnowania. Poznań – Wrocław, 2010, ss. 140.
16. Obwieszczenie Ministra Gospodarki z dnia 28 kwietnia 2014 r. w sprawie listy akredytowanych laboratoriów upoważnionych do wykonywania badań potwierdzających spełnianie przez nawozy oznaczone znakiem „NAWÓZ WE” wymagań określonych dla tych nawozów w odrębnych przepisach.
17. Ochal P.: Wapnowanie podstawowym elementem dobrych praktyk rolniczych. Studia i Raporty IUNG-PIB, Puławy, 2013, **37(11)**: 9-18.
18. Rozporządzenie Komisji (UE) Nr 463/2013 z dnia 17 maja 2013 r. zmieniające Rozporządzenie (WE) 003/2003 Parlamentu Europejskiego i Rady w sprawie nawozów w celu dostosowania jego załączników I, II i IV do postępu technicznego (Dz.U. UE.L.2013.134.1).
19. Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 8 września 2010 r. w sprawie sposobu pakowania nawozów mineralnych, umieszczania informacji o składnikach nawozowych na tych opakowaniach, sposobu badania nawozów mineralnych oraz typów wapna nawozowego (Dz.U. z 2010 r., nr 183, poz. 1229).
20. Rozporządzenie Ministra Rolnictwa i Rozwoju Wsi z dnia 18 czerwca 2008 r. w sprawie wykonania niektórych przepisów ustawy o nawozach i nawożeniu (Dz.U. z 2008 r., nr 119, poz. 765).
21. Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 20 stycznia 2015 r. w sprawie procesu odzysku R10.
22. Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 6 lutego 2015 r. w sprawie komunalnych osadów ściekowych.
23. Winiarski R.: Rynek nawozów mineralnych w Polsce. Studia i Raporty IUNG-PIB, 2013, **37(11)**:139-162.

Adres do korespondencji:

dr Piotr Ochal
Zakład Żywienia Roślin i Nawożenia
IUNG-PIB
ul. Czartoryskich 8
24-100 Puławy
tel. 81 47 86 842
e-mail: pochal@iung.pulawy.pl

Anna Kocoń

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

AKTUALNE TRENDY I INNOWACJE W DOLISTNYM DOKARMIANIU ROŚLIN UPRAWNYCH*

Słowa kluczowe: nawozy dolistne, koncentracje składników w nawozie, forma chemiczna nawozu, dokarmianie roślin, plon

Wstęp

Rośliny pobierają składniki pokarmowe głównie przez korzenie. Są one podstawowymi organami przystosowanymi do tego celu. Jednak rośliny mogą i pobierają składniki mineralne także przez liście oraz zielone części roślin. Mimo iż wszystkie składniki pokarmowe mogą być podawane i pobierane przez liście, występują ograniczenia co do ilości pobrania niektórych z nich (1, 13, 20). Tą drogą można dostarczyć tylko niewielką ilość makroskładników w stosunku do potrzeb rośliny, szczególnie jeśli chodzi o podstawowe makroelementy, do których należą NPK. Stąd też nawożenie dolistne traktowane jest jako uzupełnienie podstawowego nawożenia doglebowego roślin i określane jest mianem ich dokarmiania. Chociaż w przypadku mikroelementów, ze względu na niewielkie potrzeby roślin, tą drogą można podać nawet całą dawkę składnika (10, 16, 18).

Dokarmianie dolistne jest jedną z form nawożenia pogłównego, gdzie nawóz w postaci roztworu wodnego jest podawany na liście roślin w formie oprysku, najczęściej jako uzupełnienie nawożenia doglebowego. Podstawowym kryterium efektywności tego sposobu nawożenia jest tempo absorpcji i przemieszczania składników pokarmowych wewnątrz rośliny. Składniki pokarmowe pobierane są przez liście w postaci kationów i anionów. Kationy, podane zwłaszcza w formie soli, na ogół pobierane są szybciej od anionów. Z badań wynika, iż przez liście najszybciej pobierany jest azot, następnie magnez i sód, w dalszej kolejności cynk, mangan, bor, a dużo wolniej potas, fosfor czy siarka (20). Główną zaletą dolistnego dokarmiania jest szybkość i efektywność działania składnika (14, 20). Przyjmuje się, iż mikroelementy są 10-, a niektóre nawet 30-krotnie lepiej wykorzystywane przez rośliny w porównaniu

* Opracowanie wykonano w ramach zadania 2.2 w programie wieloletnim IUNG-PIB.

z ich dogłębowym stosowaniem (10, 16). Dokarmianie dolistne to metoda bardziej przyjazna dla środowiska, która pozwala uzyskać wysoką efektywność wykonywanego zabiegu, przy jednoczesnym ograniczeniu strat, bowiem ilość nawozu użytego do nawożenia, zwłaszcza jeśli chodzi o mikroelementy, jest stosunkowo niewielka w porównaniu ze standardowymi metodami nawożenia (16).

Dolistne dokarmianie roślin jest nieodzownym elementem rolnictwa intensywnego i zrównoważonego. Może być stosowane zapobiegawczo dla pełnego pokrycia potrzeb pokarmowych roślin lub interwencyjnie – w przypadku niedoboru składników pokarmowych (1, 2, 3, 9, 14, 18, 20, 22). Celem dokarmiania zapobiegawczego jest uzyskanie wysokich plonów roślin poprzez eliminowanie ukrytych niedoborów składników pokarmowych. Dotyczy to przede wszystkim intensywnych upraw i krytycznych faz wzrostu, kiedy to z różnych względów korzeń nie jest w stanie dostarczyć wymaganej ilości składników, nawet przy ich wystarczającej zawartości w glebie. Jak podają *Szewczuk i Sugier* (19), uzyskanie wysokich plonów, np. powyżej 5 t z hektara ziarna zbóż lub ponad 4 t z ha nasion rzepaku, bez dokarmiania roślin w okresie wegetacji nawozami dolistnymi jest mało realne.

Na krajowym rynku istnieje szeroka gama nawozów dolistnych (ponad 200) i dlatego warto wiedzieć, czym kierować się przy wyborze konkretnego produktu pod określone uprawy. Mimo dużej liczby produktów w tej grupie nawozów, oferta nie jest zbyt różnorodna, gdyż producenci wprowadzając nowe środki na rynek, rzadko modyfikują podstawowy skład nawozu. Zazwyczaj tylko proporcje składników są zmieniane lub dodawane są inne związki chelatujące czy kompleksujące, fitohormony oraz adiuwanty. Dodatki takie jak fitohormony czy adiuwanty można dzisiaj kupić oddzielnie, co na ogół jest tańszym i korzystniejszym rozwiązaniem (18).

Celem opracowania jest zatem przybliżenie wiedzy na temat dostępnych na polskim rynku nawozów dolistnych, przykładowych zaleceń ich aplikacji w dokarmianiu roślin uprawy polowej, a także efektywności plonotwórczej ich stosowania.

Rynek nawozów dolistnych w Polsce

Jeszcze do roku 1970 rynek nawozów dolistnych zdominowany był głównie przez produkty oparte na nieorganicznych związkach, występujących w postaci soli. Od lat 80. XX wieku zaczęto wprowadzać na polski rynek różne warianty „schelatowanych” i „skompleksowanych” różnymi związkami organicznymi nawozy mikroelementowe. Określenie „schelatowany składnik pokarmowy” oznacza jego związanie przez jeden z wielu związków organicznych, w skrócie określanym jako: EDTA, DTPA, EDDHA, HEEDTA i in. Na przykład EDTA to kwas etylenodiaminotetraoctowy ($C_{10}H_{16}O_8N_2$), DTPA – kwas dietylenotriaminopentaoctowy ($C_{14}H_{23}O_{10}N_3$). Jednym z ważniejszych kryteriów wyboru rodzaju chelatora jest współczynnik stabilności, który informuje o sile wiązania metalu z czynnikiem chelatującym. Wyższy współczynnik oznacza lepszą stabilność. Tak dla przykładu, współczynnik

stabilności dla EDTA i EDDHA z żelazem (Fe^{3+}) wynosi odpowiednio: 25 i 33,9 (19). Natomiast określenie „skompleksowany składnik pokarmowy” oznacza jego związanie ze związkiem kompleksującym innym niż wyżej wymienione chelaty, np. z kwasem cytrynowym, askorbinowym, bursztynowym. Należy dodać, że chelatowane mogą być tylko metale, natomiast kompleksowane zarówno metale, jak i niemetale.

Mając na uwadze szeroką gamę dostępnych na naszym rynku nawozów dolistnych, można za *Szewczukiem i Sugier* (19) podzielić je według następujących kryteriów: właściwości fizycznych, formy chemicznej, dodatkowych składników i substancji poprawiających cechy użytkowe nawozów, liczby i rodzaju pierwiastków występujących w nawozach oraz ich przeznaczenia. Poniżej podano podział nawozów w zależności od rodzaju kryterium.

Właściwości fizyczne

- płynne i zawiesinowe, powszechne w stosowaniu, wygodne w użyciu, charakteryzujące się na ogół mniejszą koncentracją składników;
- krystaliczne (sympkie), z reguły charakteryzują się wyższą koncentracją składników oraz niższą ceną jednostkową czystego składnika.

Forma chemiczna

- w postaci soli lub tlenków, obecnie rzadziej stosowane ze względu na gorsze wykorzystanie zawartych w nich składników pokarmowych;
- w postaci schelatowanej lub skompleksowanej, co umożliwia lepsze wykorzystanie składników przez rośliny.

Dodatkowe składniki i substancje poprawiające cechy użytkowe nawozów

- bez dodatkowych składników, obecnie dominują na rynku;
- z dodatkiem innych składników mineralnych, np. Na, Si, Co, J, Ti i Se. Dodatki te pełnią różne funkcje i są zalecane pod określone uprawy lub jako uniwersalne, np. tytan (Ti). Krzem (Si) i Tytan (Ti) spełniają funkcje ochronne przeciwko patogenom grzybowym lub traktowane są jako biostymulatory;
- z dodatkiem substancji poprawiających cechy użytkowe nawozu i zwiększające przyswajalność składników pokarmowych, np. regulatorów wzrostu (głównie auksyn), emulgatorów, środków obniżających napięcie powierzchniowe, zwiększających przyczepność, rozluźniających zewnętrzne warstwy liścia (kutykuli);
- charakteryzujących się wysoką wartością pH (11,5-13,5), co ogranicza rozwój patogenów.

Liczba i rodzaj pierwiastków występujących w nawozach

- pojedyncze, z reguły z bardzo dużą koncentracją składnika;
- wieloskładnikowe, zawierające co najmniej dwa pierwiastki. Do tej grupy

należą nawozy kilkuskładnikowe (2-5 pierwiastków), z wyższą koncentracją składników oraz typowe nawozy wieloskładnikowe, zawierające więcej niż 5 pierwiastków (najczęściej 8-12), zazwyczaj o mniejszej koncentracji;

- makroelementowe, z wysoką koncentracją makroelementów;
- mikroelementowe, zawierające głównie mikroelementy, niekiedy z dodatkiem azotu i magnezu. Te nawozy dominują na naszym rynku.

W zależności od przeznaczenia

- pod określoną uprawę, a nawet fazę rozwojową rośliny;
- uniwersalne, zalecane pod szeroką gamę roślin uprawnych.

Jakimi kryteriami kierować się przy wyborze nawozu?

Przy wyborze nawozu dolistnego pod określone uprawy należy przede wszystkim kierować się koncentracjami poszczególnych składników oraz właściwościami fizykochemicznymi nawozu. Obecnie na polskim rynku dominują płynne dolistne nawozy wieloskładnikowe. Ich zaletą jest niska cena oraz szeroka gama składników w nich zawartych, a także łatwa w użyciu płynna forma. Natomiast wadą, zwłaszcza płynnych, są niskie koncentracje składników, chociaż w nawozach krystalicznych ich koncentracje mogą być znacznie większe. Stąd też, w wyniku ich pojedynczej aplikacji nalistnej, nie jest możliwe pokrycie potrzeb pokarmowych roślin, w związku z tym konieczne jest ich wielokrotne stosowanie. Funkcjonujące na rynku krajowym dolistne nawozy wieloskładnikowe, w zależności od koncentracji składników, Sze w c z u k i S u g i e r (19) podzielili na 4 grupy, o niskiej, średniej, wysokiej i bardzo wysokiej zawartości makro- i mikroskładników (tab. 1). Z rolniczego punktu widzenia najlepsze są nawozy o bardzo wysokich koncentracjach składników. Dlatego też godne uwagi są nawozy jedno- i kilkuskładnikowe (do 5 składników), które charakteryzują się na ogół wyższymi koncentracjami pierwiastków i które mogą być stosowane zarówno osobno, jak i łącznie z innymi nawozami wieloskładnikowymi.

Ze względu na formę chemiczną nawozu i wykorzystanie składników pokarmowych przez rośliny, znacznie lepsze są produkty, w których składniki występują w postaci organicznych związków chelatujących lub innych kompleksów organiczno-mineralnych, w porównaniu do nawozów, w których składniki występują w postaci soli. W tych drugich, przy ich aplikacji, istotne znaczenie odgrywa fitotoksyczność, która może występować już przy stosunkowo niskich koncentracjach, co uniemożliwia stosowanie roztworów o wyższych stężeniach. Ponadto podane na liście składniki w formie soli potrzebują dodatkowych nośników w roślinie, którymi najczęściej są białka, aminokwasy czy inne związki organiczne ułatwiające transport jonu do komórki i wewnątrz niej (20). Stąd też zrodził się pomysł stosowania mineralnych składników pokarmowych w formie chelatów. Są to związki, które składają się

z atomu metalu połączonego kilkoma wiązaniami koordynacyjnymi ze związkiem organicznym – chelatorem, tworzące budowę pierścieniową. Stosowanie chelatów w dokarmianiu roślin nie zwiększa pobierania danego składnika przez części nadziemne roślin w porównaniu z pobieraniem tych składników w formie soli mineralnych, ale zapewnia szybszą absorpcję i przemieszczanie się w roślinie, a ponadto sprzyja ich metabolizmowi (14, 20).

Tabela 1

Ocena zawartości makro- i mikroelementów
w dolistnych nawozach wieloskładnikowych (w % wagowych)

Składnik	Ocena zawartości			
	niska	średnia	wysoka	bardzo wysoka
N	do 5,0	5,1-10,0	10,1-20,0	>20,0
P	do 1,5	1,6-2,5	2,6-5,0	>5,0
K	do 5,0	5,1-10,0	10,1-20,0	>20,0
Mg	do 1,5	1,6-3,0	3,1-5,0	>5,0
S	do 1,5	1,6-3,0	3,1-5,0	>5,0
B	do 0,4	0,5-0,8	0,9-1,2	>1,2
Cu	do 0,3	0,4-0,6	0,7-1,0	>1,0
Zn	do 0,4	0,5-0,8	0,9-1,2	>1,2
Mn	do 0,5	0,6-0,9	1,0-1,5	>1,5
Fe	do 0,5	0,6-0,9	1,0-1,5	>1,5
Mo	do 0,005	0,006-0,009	0,01-0,03	>0,03

Źródło: Szewczuk i Sugier, 2009 (19)

Dolistne dokarmianie roślin uprawy polowej

Jednym z warunków uzyskiwania dużych plonów roślin jest zbilansowany system nawożenia dostosowany do potrzeb pokarmowych i nawozowych danej rośliny. Każdy gatunek ma swoje wymagania pokarmowe, a co za tym idzie i wymagania nawozowe co do ilości niezbędnych składników makro- i mikro-, jakie roślina musi pobrać dla wydania odpowiedniego plonu. Na przykład rzepak zaliczany jest do roślin o większych wymaganiach pokarmowych w porównaniu ze zbożami (5). Z badań IUNG-PIB wynika, że z plonem nasion w wysokości 4 t/ha rośliny rzepaku pobierają średnio około: 220 kg N, 43 kg P, 230 kg K, 25 kg Mg, 60 kg S, a także znaczne ilości mikroelementów: 240 g B, 400 g Mn, 420 g Zn, 100 g Cu oraz 6 g Mo. Natomiast zboża, średnio z plonem ziarna 4 t/ha, wynoszą około: 120 kg N, 22 kg P, 72 kg K, 10 kg Mg oraz: 20 g B, 400 g Mn, 320 g Zn, 36 g Cu, 4 g Mo. Plony zbóż w gospodarstwach produkcyjnych często są większe niż 4 t/ha, więc i potrzeby

pokarmowe i nawozowe w stosunku do oczekiwanego plonu są odpowiednio wyższe. Chcąc pokryć potrzeby pokarmowe roślin, należy zaplanować odpowiednią strategię zbilansowanego i zrównoważonego ich nawożenia, uwzględniającą zapotrzebowanie roślin na wszystkie niezbędne makro- i mikroskładniki oraz nawożenie nie tylko dogłębowe, ale również dolistne (7).

Jak wykazały badania, gleby Polski aż w 75% charakteryzują się niedostateczną zawartością boru (B), 40% jest ubogich w miedź (Cu), 20% w molibden (Mo) i około 10% w cynk (Zn) i mangan (Mn) (16). Ponadto często mikroelementy, nawet przy wystarczającej zasobności gleb w ww. składniki, przy pH wyższym od 6,5, są trudniej lub nawet niedostępne dla uprawianych roślin. Także w niesprzyjających warunkach pogodowych część składników pokarmowych z gleby jest słabo dostępna dla roślin, stąd tak ważne jest dostarczenie ich roślinom w aplikacji dolistnej.

Mimo, że mikroelementy pobierane są przez rośliny w niewielkich ilościach, w porównaniu z makroelementami, od kilku gramów do około 2 kg z ha, to są pierwiastkami niezbędnymi w ich żywieniu, bez których rośliny nie mogłyby rosnąć i wydać odpowiedniego plonu. Generalnie rola mikroelementów w roślinach sprowadza się głównie do regulacji procesów biochemicznych, tym niemniej funkcja każdego z nich jest ogromna i nie może być zastąpiona innym pierwiastkiem. Jako składniki lub aktywatory enzymów, mikroelementy uczestniczą w wielu reakcjach metabolicznych oraz spełniają bardzo ważne funkcje fizjologiczne w roślinach, m.in. decydujące o efektywnym wykorzystaniu azotu, potasu, fosforu oraz pozostałych makroelementów. Niedobór mikroelementów w roślinach prowadzi w pierwszej kolejności do zahamowania podstawowych procesów, w tym fotosyntezy i dystrybucji asymilatów (9, 21) oraz do większej podatności roślin na niekorzystne warunki środowiska, a następnie do obniżenia wielkości plonu i pogorszenia jego jakości. W intensywnych technologiach uprawy roślin, nawożenie dolistne azotem, magnezem oraz mikroelementami, a niekiedy potasem i fosforem, ma na celu nie tylko uzupełniać ich niedobory, ale także spełniać rolę stymulatorów przyrostu biomasy, plonu organów rolniczo użytecznych.

W tabeli 2 podano przykładowe zalecane terminy i fazy rozwojowe dla dolistnego dokarmiania niektórych, ważniejszych upraw polowych. Do dokarmiania roślin najczęściej stosuje się wieloskładnikowe nawozy płynne z mikroelementami, wodny roztwór mocznika oraz jedno- lub siedmiowodny roztwór magnezu. Zabieg ten często wykonuje się w połączeniu z zabiegami i środkami ochrony roślin. Wieloskładnikowe nawozy płynne, oprócz mikroelementów, zawierają zestaw makroskładników dla konkretnego gatunku rośliny, przy zachowaniu odpowiednich proporcji między składnikami. Wiadomo bowiem, iż każdy gatunek rośliny ma inne wymagania pokarmowe i jest szczególnie wrażliwy na niedobór konkretnego składnika, szczególnie odnosi się to do mikroelementu (tab. 2).

Tabela 2

Zalecane fazy rozwojowe i terminy stosowania nawozów z dodatkiem mocznika, magnezu i mikroelementów w dolistnym dokarmianiu niektórych upraw

Roślina	Faza rozwojowa lub termin oprysku	Stężenie w % cieczy roboczej		Mikroelementy	
		mocznika	magnezu	stężenie wg zaleceń producenta	wrażliwe na niedobór
Zboża	1. Ozime – w połowie października	-	do 5	+	miedź, cynk, mangan
	2. Ozime i jare – w f. krzewienia	do 15	do 5	+	
	3. P. strzelania w źdźbło – wiosna	do 10	do 5	+	
	4. Po wytwor. liścia flagowego	do 8	do 5	+	
	5. W fazie nalewania ziarna	do 6	-	-	
Rzepak	1. Ozimy – w poł. października	-	do 5	+	bor, mangan, molibden
	2. Ozimy – po ruszeniu wegetacji	do 15	do 5	+	
	Jary – po wytworzeniu 6-8 liści	do 15	do 5	+	
	3. W fazie zielonego pąka	do 10	do 5	+	
Ziemniak	4. W fazie zielonej luszczyny	do 8	do 5	+	miedź, cynk, mangan
	1. Przed zwarem międzyczęści	do 6	do 5	+	
	2. Przed kwitnieniem	do 6	do 5	+	
Burak	3. Po 2 tygodniach	do 6	do 5	+	bor, mangan, molibden
	1. W fazie 6-8 liści	do 6	do 5	+	
	2. Po 2 tygodniach	do 6	do 5	+	
Kukurydza	3. Przed zakryciem międzyczęści	do 6	do 5	+	cynk, bor, miedź, mangan
	1. Po wytworzeniu 6. liścia	do 6	do 5	+	
	2. Po około 10 dniach	do 6	do 5	+	
	3. Po około 10 dniach	do 6	do 5	+	

* podane stężenie dotyczy $MgSO_4 \cdot 7H_2O$, w przypadku $MgSO_4 \cdot H_2O$ stosować w stężeniu do 2,5%.

Źródło: opracowanie własne

Obecnie w intensywnych technologiach uprawy roślin zaleca się, niezależnie od nawożenia doglebowego, kilkakrotne dolistne dokarmianie roślin (3, 9, 17). Pierwsze stosuje się w przypadku zbóż i rzepaku ozimego przed zimą, około połowy października (tab. 2). Celem jesiennego dokarmiania jest lepsze odżywienie roślin i zapewnienie tzw. dobrego „startu” poprzez dostarczenie młodym roślinom wszystkich niezbędnych składników w postaci łatwo przyswajalnych form makro- i mikroelementów oraz poprawienie ich zimotrwałości. Następne stosuje się na wiosnę i obejmuje fazę ruszenia wegetacji (czy w przypadku zbóż jarych fazę krzewienia), strzelania w źdźbło oraz fazę po kwitnieniu roślin – a nawet fazę nalewania i wypełniania ziarna (w pszenicach jakościowych). Są to fazy krytyczne w rozwoju zbóż,

a nawożenie w tych fazach ma na celu zabezpieczenie i dostarczenie roślinom łatwo dostępnych składników pokarmowych, stosownie do ich potrzeb. Przy dolistnym dokarmianiu roślin należy zwracać uwagę na dopuszczalne stężenia roztworu, szczególnie mocznika, w zależności od fazy rozwojowej roślin (tab. 2). Zasadą jest, że rośliny młodsze znoszą większe obciążenie tym składnikiem, stąd w młodocianych stadiach rozwojowych dopuszcza się wyższe stężenia roztworu mocznika, dochodzące nawet do 15%. Natomiast rośliny starsze są bardziej wrażliwe i wówczas zaleca się 6% roztwór mocznika, a niekiedy nawet 4%.

Dokarmianie nalistne roślin stosuje się także w przypadku uzupełnienia niedoborów składników pokarmowych, wynikających nie tylko z niskiej zawartości w glebach, ale także z utrudnionego ich pobierania, nawet przy wysokiej zasobności gleb, co m.in. ma miejsce przy pH gleby $>6,5$, gdzie wszystkie mikroelementy, za wyjątkiem molibdenu, ulegają uwsteczniению. Ponadto dolistne dokarmianie wielu roślin daje dobre efekty w warunkach utrudnionego pobierania składników w czasie suszy czy chłodu.

Optymalne warunki prawidłowej aplikacji dolistnej nawozu

- Ciecz użytkową, przeznaczoną do dolistnego dokarmiania roślin należy przygotować bezpośrednio przed jej stosowaniem, żeby nie zachodziły w niej niekorzystne reakcje chemiczne między zmieszanyimi środkami.
- Ciecz robocza powinna mieć temperaturę wyższą od 10°C . Jest to ważne, gdy zabieg wykonuje się przy wysokich temperaturach powietrza, aby nie powodować dodatkowego stresu roślin i ich poparzeń.
- Przy sporządzaniu cieczy roboczej należy zachować bezpieczne stężenia składników (zwłaszcza mocznika) oraz kolejność ich łączenia; najpierw mocznik, następnie siarczan magnezu, mikroelementy, a na końcu środek ochrony roślin.
- Do sporządzanego roztworu nawozów można dodać jeden środek ochrony roślin (grzybo- lub owadobójczy), zgodnie z instrukcją jego stosowania. Wskazany jest też dodatek zwilżacza.
- W przeliczeniu na 1 ha należy przewidzieć około 300 litrów roztworu cieczy roboczej. Zasadą jest, by równomiernie zwilżyć rośliny, a jednocześnie, by naniezione roztwór nie spływał z liści do gleby.
- Optymalną temperaturą dla wykonania oprysku roślin oraz dobrej przyswajalności podawanych składników jest $12\text{--}20^{\circ}\text{C}$. Po przekroczeniu 25°C oprysk nie powinien być wykonywany, gdyż może powodować uszkodzenia (poparzenia) roślin.
- Opryski należy wykonywać wieczorem lub całonocowo w pochmurny dzień. Wybierając termin oprysku, należy uwzględnić prognozę pogody, aby w okresie 48 godzin po oprysku nie spadł większy deszcz.

Wpływ dolistnego dokarmiania na plon i jego jakość

Czynnikami wpływającymi na pobieranie składników przez nadziemne części roślin są: czynniki środowiskowe (m.in. warunki klimatyczne, pora dnia), roślinne (gatunek, wiek liścia, turgor liścia, kutykula, ektodesmy i in.) oraz oprysk (stężenie, technika opryskiwania, czynnik zwilżający, higroskopijność, forma stosowanego związku i in.). Niektóre z tych czynników działają bezpośrednio i dwukierunkowo, np. światło i temperatura. Oba te czynniki sprzyjają powstawaniu powłoki woskowej, ale równocześnie sprzyjają aktywnemu pobieraniu. Inne są niejako współzależne, np. grubość powłoki woskowej i wiek liścia. Bogactwo czynników wpływających na absorpcję składników pokarmowych przez nadziemne części roślin (liść) prowadzi do dużej zmienności w pobieraniu, a tym samym dużej zmienności w plonowaniu roślin (20). W związku z tym, wyniki doświadczeń nie zawsze są jednoznaczne pod względem wysokości, jak i jakości plonu.

Efektywność dolistnego dokarmiania roślin zależy od zastosowanego asortymentu nawozów, ilości zabiegów, technologii stosowania, gatunku rośliny oraz warunków pogodowych. Na przykład w trzyletnich badaniach polowych Jabłońskiego (6), dotyczących dolistnego dokarmiania ziemniaka różnymi nawozami, podawanymi w dwóch terminach, stwierdzono istotny wzrost plonu ogólnego (od 4 do 12%) i handlowego (6,7-15,5%) ziemniaka w stosunku do obiektów kontrolnych, w których nie stosowano nawozów dolistnych (tab. 3). Ponadto w tych doświadczeniach wykazano także, że badane nawozy mikroelementowe nie miały istotnego wpływu na zawartość skrobi w bulwach.

Tabela 3

Wpływ dolistnego nawożenia Basfoliarem 36 E i ADOB Mn
na plon ziemniaków i zawartość skrobi

Obiekty	Plon ziarna w t·ha ⁻¹		Zawartość skrobi (%)
	ogólny	handlowy	
Kontrola	41,9	37,3	15,5
Basfoliar 36	46,8	43,1	15,5
Basfoliar 36 E + Solubor	45,8	41,6	15,6
ADOB Mn	44,6	41,4	16,0
Solobor	43,6	39,8	15,9
NIR _{0,05}	3,2	2,6	r.n.

Źródło: Jabłoński, 2003 (6)

Natomiast w trzyletnich badaniach Jareckiego i Bobreckiej-Jamro (8) z pszenicą jarą dokarmianą mocznikiem i Mikrokompleksem stwierdzono, że zastosowane nawozy nie modyfikowały liczby ziaren w kłosie i MTN, jednak plon nasion

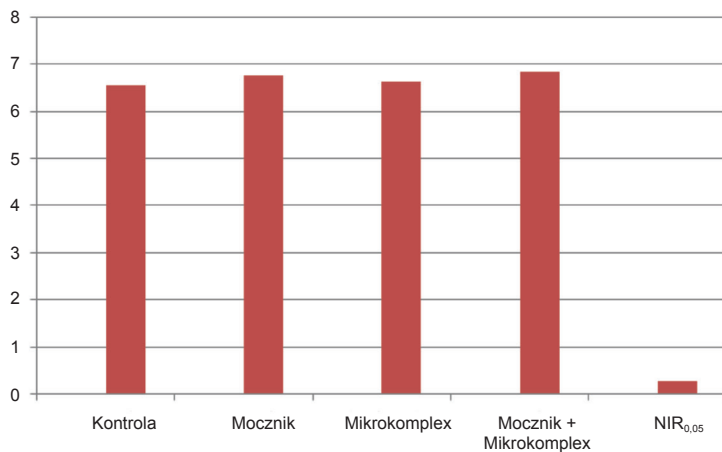
w obiektach dokarmianych był większy w porównaniu z kontrolą, przy czym istotna różnica dotyczyła tylko łącznej aplikacji mocznika i Mikrokomplexu (rys. 1), również największą zawartość białka ogólnego otrzymano w ziarnie ww. obiektów i wyniosła ona 14,6 % w stosunku do kontroli (rys. 2). W badaniach własnych (9) prowadzonych nad efektywnością dolistnego dokarmiania pszenicy i rzepaku ozimego wybranymi nawozami, w ramach ścisłych doświadczeń wazonowych, w warunkach optymalnego podstawowego nawożenia i uwilgotnienia gleby wykazano, że dolistne dokarmianie ww. roślin zawsze prowadziło do wzrostu plonu nasion, niezależnie od układu i zestawu zastosowanych nawozów (tab. 4). Przyrost plonu nasion pszenicy i rzepaku był największy w obiektach, w których dokarmiano rośliny jesienią i wiosną, najszerszym asortymentem nawozów dolistnych i wyniósł 4% dla pszenicy i 7% dla rzepaku w stosunku do obiektów kontrolnych. Wzrost plonu nasion rzepaku związany był z przyrostem liczby łuszczyń z rośliny i z wazonu, a także w niewielkim stopniu ze wzrostem MTN. W przypadku pszenicy o wzroście plonu zdecydowało głównie lepsze wypełnienie ziarna, czyli MTN, a w mniejszym stopniu wzrost liczby kłosów w wazonie. Uzyskany pozytywny efekt plonotwórczy testowanych nawozów w warunkach optymalnych nawożenia podstawowego i nawadniania podłoża świadczył o celowości dolistnego dokarmiania pszenicy i rzepaku ozimego nawet w warunkach uprawy, kiedy wydawałoby się, że dostępność składników pokarmowych jest optymalna.

Tabela 4

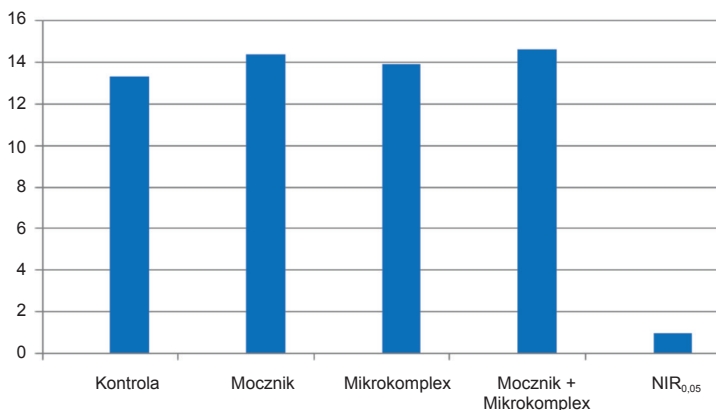
Plony nasion oraz niektóre parametry struktury
plonu pszenicy i rzepaku ozimego (średnie z dwóch lat)

Obiekt	Pszenica ozima			Rzepak ozimy		
	plon (g·waz. ⁻¹)	liczba kłosów	MTN (g)	plon (g·waz. ⁻¹)	liczba łuszczyń	MTN (g)
1. Kontrola	88,0	41,3	41,2	53,3	781,7	3,28
2. Plonvit Z + MgSO ₄ (jesień) + Plonvit Z + MgSO ₄ + Mocznik + Tytanit (2-krotny oprysk roślin wiosną)	91,4	43,0	42,7	57,2	853,0	3,23
3. Plonvit Z + MgSO ₄ + Mocznik + Tytanit (2-krotny oprysk roślin wiosną)	91,0	42,7	42,4	57,0	851,7	3,34
4. Mocznik + Tytanit (2-krotny oprysk roślin wiosną)	90,2	42,0	43,4	55,9	809,0	3,42
NIR _{0,05}	2,18	r.n	1,22	3,17	33,21	r.n.

Źródło: Kocoń, 2009 (9)

Rys. 1. Plon ziarna pszenicy jarej odmiany Parabola (t·ha⁻¹)

Źródło: Jarecki i Bobrecka-Jamro, 2011 (8)



Rys. 2. Średnia zawartość białka ogółem (% s.m.) w ziarnie pszenicy jarej (2008-2010)

Źródło: Jarecki i Bobrecka-Jamro, 2011 (8)

Zdaniem S z e w c z u k a (17), rośliny rzepaku w uprawach polowych na ogół reagują pozytywnie na stosowane dokarmianie dolistne, a przyrost plonu nasion często jest znaczący. Cytowany autor, w zależności od ilości stosowanych zabiegów i zestawu użytych nawozów, uzyskał średnio dla rzepaku od 11 do 21% wzrost plonu nasion w porównaniu z kontrolą, w której nie stosowano nawozów dolistnych.

Innowacje w nawozach dolistnych

W ostatnich kilkunastu czy nawet kilku latach, na rynku polskim nastąpił znaczny postęp technologiczny w nawozach dolistnych i dotyczy on m.in. czynnika chelatującego i kompleksującego. Jako czynnik chelatujący wprowadzono IDHA. Innowacyjny czynnik chelatujący nowej generacji, który w odróżnieniu od większości związków chelatujących dostępnych do tej pory na rynku, po aplikacji dolistnej ulega prawie całkowitej biodegradacji. Oznacza to, iż w czasie kilkunastu dni od zastosowania rozkłada się w 80% na proste, nieszkodliwe dla środowiska związki. Ze względu na biodegradowalność oraz odpowiednio wysoką stałą kompleksowania, IDHA stanowi doskonałą alternatywę dla popularnego EDTA. Z łatwością tworzy efektywne agronomiczne połączenia, m.in. z żelazem, miedzią, cynkiem i manganem. Jest doskonale tolerowany przez rośliny i bezpieczny w stosowaniu.

Natomiast nowością wśród czynników kompleksujących są aminokwasy. Obecnie na naszym rynku pojawiły się pierwsze polskie stymulatory i nawozy z aminokwasami do aplikacji dolistnej (15). W badaniach rolniczych prowadzonych w IUNG-PIB, przed dopuszczeniem przez właściwego ministra MRiRW tychże stymulatorów i nawozów na rynek (zgodnie z obowiązującymi procedurami wprowadzania na rynek nowych nawozów i stymulatorów), stwierdzono korzystny wpływ ww. produktów na wybrane procesy fizjologiczne, wzrost i rozwój roślin oraz ich plonowanie. Stwierdzono między innymi istotny wzrost natężenia intensywności fotosyntezy netto, zwiększone pobieranie wybranych składników pokarmowych przez testowane rośliny, przyrost ich biomasy oraz plonu użytecznego rolniczo w stosunku do obiektów kontrolnych, w których nie stosowano ww. nawozów (11, 12). Również pierwsze doniesienia z praktycznego ich stosowania w rolnictwie, w uprawach rolnych i w sadownictwie, są zadowalające. Pozytywny efekt ich stosowania, jak się wydaje, wynika z szybszego i lepszego wykorzystania składników z tych nawozów. Makro- i mikroelementy zawarte w nawozach z aminokwasami pobierane są prawie w całości, w ciągu 2-5 godzin (4). Molekuły aminokwasów, w odróżnieniu od soli technicznych czy syntetycznych chelatów, są znacznie mniejsze, elektrycznie obojętne (15), dzięki czemu mogą być transferowane w komórce rośliny przez ektodesmy do membrany plazmatycznej (plazmalemmy). Końcowa absorpcja minerałów z plazmalemmy do cytoplazmy jest możliwa dzięki aminokwasom zawartym w nawozie. Aminokwasy, dzięki pełnej kompatybilności z metabolizmem nawożonych roślin, zapewniają szybki i łatwy transport składników odżywczych wewnątrz roślin do miejsc, w których jest największy deficyt danego składnika. Dzięki tym zaletom, nawozy zawierające aminokwasy, mimo że są droższe niż tradycyjne, zyskują coraz większą popularność.

Ostatnie lata to również innowacje w nawozach dolistnych polegające na zastosowaniu nanotechnologii. Innowacyjność tzw. „nanonawozów” polega na możliwości otrzymywania i zastosowania struktur, których przynajmniej dla jednego wymiaru

jednostką naturalną jest nanometr, czyli 10^{-9} metra. Struktury takie cechują osobliwe możliwości działania fizycznego, chemicznego i biologicznego. Z uwagi na nano rozmiary, uzyskujemy większą powierzchnię czynną, co oznacza bardzo szybką ich absorpcję przez przestrzenie międzykutykularne, przetchlinki i aparaty szparkowe. Bardzo małe rozmiary umożliwiają szybkie przemieszczanie się nanocząsteczek po całej roślinie.

Podsumowanie

Dolistne dokarmianie roślin daje na ogół dobre efekty w gospodarstwach reprezentujących wysoki poziom agrotechniki, przy oczekiwanych dużych plonach. Prawidłowo zastosowane dolistne dokarmianie roślin wykazuje szereg wymiernych zalet w porównaniu z niektórymi elementami tradycyjnej techniki nawożenia, m.in. lepsze i szybsze wykorzystanie składników, zwłaszcza mikroelementów, ze względu na mniejsze ilości stosowane w dolistnej aplikacji, w porównaniu z nawożeniem doglebowym. Ponadto dozowanie składników pokarmowych w niewielkich dawkach, w zależności od potrzeb roślin, zapobiega zanieczyszczeniu środowiska.

Oferowane na rynku nawozy do dolistnego dokarmiania roślin można podzielić według różnych kryteriów, jednak najważniejszym kryterium, którym należy się kierować przy wyborze nawozu jest koncentracja składników i związana z tym możliwość zaspokajania potrzeb pokarmowych roślin, a także właściwości fizykochemiczne nawozu. Obecnie preferowane są nawozy dolistne, w których składniki występują w postaci schelatowanej lub skompleksowanej, gdyż taka forma umożliwia lepsze ich wykorzystanie przez rośliny w porównaniu do form w postaci soli lub tlenków, z których wykorzystanie składników pokarmowych jest gorsze. W ostatnich latach na rynku polskim nastąpił znaczny postęp technologiczny w nawozach dolistnych, który dotyczy m.in. czynnika chelatującego i kompleksującego. Jako czynnik chelatujący wprowadzono IDHA, który po aplikacji ulega prawie całkowitej biodegradacji. Natomiast nowością wśród czynników kompleksujących są aminokwasy. Obecnie na naszym rynku pojawiły się już pierwsze polskie nawozy i stymulatory z aminokwasami do aplikacji dolistnej. Wstępne wyniki badań rolniczych oraz ich stosowanie w produkcji rolniczej wypadają obiecująco. Nowością wśród nawozów dolistnych są również nanonawozy dolistne, które ze względu na bardzo małe rozmiary związków, uzyskują większą powierzchnię czynną, co przekłada się na szybszą absorpcję i przemieszczanie składników w roślinie.

Literatura

1. Alexander A.: Optimum timing of foliar nutrient sprays: Foliar fertilization (Ed. A. Alexander). Berlin, Martinus Nijhoff Publishers, 1986, 44-60.
2. Czuba R., Sztuder H., Świerczewska M.: Dolistne dokarmianie rzepaku ozimego i gorczycy białej azotem, magnezem i mikroelementami. Wyd. IUNG Puławy, 1995, **P(58)**, ss. 26.
3. Faber A., Kęsik K., Winiarski A.: Ocena skuteczności krajowych wieloskładnikowych nawozów dolistnych w doświadczeniach wazonowych i polowych. Mat. Sem. Nauk. Dolistne dokarmianie i ochrona roślin w świetle badań i doświadczeń praktyki rolniczej. Wyd. IUNG Puławy, 1998, 170-179.
4. <http://www.farmer.pl/produkcja-roslinna/nawozy/nawozy-aminokwasowe-rewolucja-w-nawozeniu,51305.html> (Data dostępu: 21.06.2016 r.).
5. <http://www.iung.pl/dpr/nawozenie.html> (Data dostępu: 22.06.2016 r.).
6. Jabłoński K.: Wpływ dolistnego nawożenia ziemniaka nawozami dolistnymi ADOB na plon roślin i jego strukturę oraz porażenie bulw ziemniaka. Acta Agrophysica, 2003, **85**: 137-143.
7. Jadczyż T., Kowalczyk J., Lipiński W.: Nawożenie mineralne na gruntach ornych i trwałych użytkach zielonych. Instrukcja upowszechnieniowa, IUNG-PIB, Puławy 2013, **184**.
8. Jarecki W., Bobrecka-Jamro D.: Reakcja pszenicy jarej odmiany Parabola na dolistne dokarmianie mocznikiem i Mikrokomplexem. Biuletyn IHAR, 2011, **262**: 39-45.
9. Kocoń A.: Efektywność dolistnego dokarmiania pszenicy i rzepaku ozimego wybranymi nawozami w warunkach optymalnego nawożenia i wilgotności gleby. Ann. UMCS Sect. E Agricultura, 2008, **63**: 23-28.
10. Kocoń A.: Perspektywy stosowania mikroelementów w uprawach rolniczych. Studia i Raporty IUNG-PIB, Puławy, 2010, **25**: 43-51.
11. Kocoń A.: Określenie wpływu nawozu organiczno-mineralnego AMINOHORT na plonowanie kukurydzy uprawianej na kiszonce. Sprawozdanie z badań. IUNG-PIB, Puławy, 2015, ss. 11.
12. Kocoń A.: Określenie wpływu stymulatora wzrostu AGRO-SORB Folium na wzrost, wybrane procesy fizjologiczne i plonowanie rzepaku ozimego. Sprawozdanie z badań. IUNG-PIB, Puławy, 2015, ss. 12.
13. Marschner H.: Mineral Nutrition of Higher Plants. Academic Press., London, 1995.
14. Michałojć Z., Szewczuk C.: Teoretyczne aspekty dolistnego dokarmiania roślin. Acta Agrophysica, 2003, **85**: 9-17.
15. Popko A.: Dolistne nawozy organiczno-mineralne wzbogacone w mikroelementy na bazie hydrolizatu białka keratyny. Streszczenie pracy doktorskiej. www.wch.pwr.edu.pl/files/prv/id1/...popko/popko_streszczenie_pracy_pol.pdf
16. Stanisławska-Głubiak E., Korzeniowska J.: Zasady nawożenia mikroelementami roślin uprawnych. Studia i Raporty IUNG-PIB, Puławy, 2007, **8**: 99-110.
17. Szewczuk C.: Wpływ stosowania wybranych nawozów dolistnych na przetrzymywanie i plony nasion rzepaku ozimego. Acta Agrophysica, 2003, **85**: 289-295.
18. Szewczuk C., Michałojć Z.: Praktyczne aspekty dolistnego dokarmiania roślin. Acta Agrophysica, 2003, **85**: 19-29.

19. Szewczuk Cz., Sugier D.: Ogólna charakterystyka i podział nawozów dolistnych oferowanych na polskim rynku. *Annales UMCS Sec. E.*, 2009, **LXIV(1)**: 29-36.
 20. Warchołowa M.: Fizjologiczne podstawy dolistnego dokarmiania roślin. *Mat. Sem. Nauk. Dolistne dokarmianie i ochrona roślin w świetle badań i doświadczeń praktyki rolniczej.* Wyd. IUNG Puławy, 1988, 5-23.
 21. Wojcieszka-Wyskupajtys U.: Fotosynteza netto w warunkach stresu świetlnego i żywieniowego. *Ekofizjologiczne aspekty reakcji roślin na działanie abiotycznych czynników stresowych.* Kraków, 1996, 567-573.
 22. Wójcik P.: Pobieranie składników mineralnych przez części nadziemne roślin z nawożenia pozakorzeniowego. *Post. Nauk Roln.*, 1998, **1**: 49-64.
-

Adres do korespondencji:

dr Anna Kocoń
Zakład Żywienia Roślin i Nawożenia
IUNG-PIB
ul. Czartoryskich 8
24-100 Puławy
tel. 81 47 86 833
e-mail: akocon@iung.pulawy.pl

Agnieszka Rutkowska

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

BIOSTYMULATORY W NOWOCZESNEJ UPRAWIE ROŚLIN*

Słowa kluczowe: stymulatory wzrostu, PGPR, kwasy humusowe, wyciągi roślinne

Wstęp

W nowoczesnej uprawie roślin biostymulatory stanowią jeden z elementów agrotechniki, który obok nawożenia i ochrony roślin może wpływać pozytywnie na wielkość i jakość plonów. Mnogość produktów o działaniu regulacyjno-stymulującym oraz bardzo szybko zachodzące innowacje w ich produkcji oraz stosowaniu powodują, że regulacje prawne nie nadążają za tempem, w jakim rozwija się rynek biostymulatorów. Szacuje się, że w krajach Unii Europejskiej w obrocie znajduje się obecnie około tysiąca tego typu preparatów, a na rynku krajowym około dwustu. Większość z nich wprowadzona została do obrotu na terenie Rzeczypospolitej Polskiej na podstawie art. 5 ustawy o nawozach i nawożeniu, który umożliwia swobodną dystrybucję nawozów i środków wspomagających uprawę roślin wyprodukowanych na terenie UE pomiędzy państwami członkowskimi bądź należącymi do Europejskiego Stowarzyszenia Wolnego Handlu (EFTA) pod warunkiem spełnienia krajowych wymagań w zakresie ich jakości. Brak jednolitych przepisów prawnych regulujących obrót tego typu preparatami w całej Wspólnocie wprowadza trudności we właściwym sklasyfikowaniu produktów o działaniu stymulującym, a równie często odżywczym, do odpowiedniej kategorii produktów wymienionych w ustawie o nawozach i nawożeniu. Problem ten dotyka zarówno jednostki opiniujące, kontrolne, jak również samych producentów czy importerów, a związany jest głównie z różnorodnością substancji aktywnych występujących w tego typu preparatach.

* Opracowanie wykonano w ramach zadania 2.2 w programie wieloletnim IUNG-PIB.

Biostymulatory – definicje oraz podział

Zgodnie z ustawą z dnia 10 lipca 2007 r. o nawozach i nawożeniu (10), stymulator wzrostu to związek organiczny lub mineralny, lub ich mieszanina, które wpływają korzystnie na rozwój roślin lub inne procesy życiowe roślin, z wyłączeniem regulatora wzrostu będącego środkiem ochrony roślin w rozumieniu przepisów o ochronie roślin. Jako ten ostatni rozumie się środki wpływające na procesy życiowe roślin, na przykład poprzez substancje działające regulująco na roślinę, inne niż substancje odżywcze (12).

Stowarzyszenie producentów biostymulatorów *European Biostimulants Industry Council* (EBIC) zaproponowało definicję biostymulatora, którą Komisja Europejska zawarła w projekcie rozporządzenia Parlamentu Europejskiego i Rady określającego zasady udostępnienia na rynku produktów nawozowych z oznakowaniem CE i zmieniającego rozporządzenie (WE) nr 1069/2009 i (WE) nr 1107/2009 (COM (2016) 157 (8)). Według tej definicji biostymulator to produkt nawozowy, który niezależnie od zawartości składników pokarmowych zawiera substancję czynną (substancje) bądź mikroorganizmy. Po zastosowaniu na roślinę albo w obrębie rizosfery materiał ten stymuluje naturalne procesy, które prowadzą do poprawy co najmniej jednej z następujących cech rośliny: efektywności wykorzystania składników pokarmowych, tolerancji na stres abiotyczny lub cech jakościowych plonów.

Podczas Pierwszego Światowego Kongresu Naukowego poświęconego stosowaniu biostymulatorów w rolnictwie, który odbył się w listopadzie 2012 r. w Strasburgu, dokonano przeglądu dostępnych na rynku i opisanych w literaturze naukowej stymulatorów wzrostu oraz przedstawiono ich klasyfikację uwzględniającą następujące grupy: substancje humusowe, kompleksowe materiały organiczne, składniki pochodzenia mineralnego, sole nieorganiczne (zawierające fosforyn), wyciągi z wodorostów morskich, pochodne chityny i chitozanu, antytranspiranty (substancje stosowane dolistnie ograniczające transpirację) oraz wolne amino-kwasy i inne związki azotowe. Do stymulatorów zalicza się również inokulanty mikrobiologiczne. Poniżej omówiono działanie tych grup stymulatorów, które są najbardziej rozpowszechnione na polskim rynku.

Inokulanty mikrobiologiczne

Stymulatory mikrobiologiczne zawierają mikroorganizmy, które naniesione na ziarno, powierzchnię roślin albo do gleby wspomagają wzrost roślin poprzez różnego rodzaju mechanizmy, obejmujące m.in.: zwiększenie pobrania składników pokarmowych, przyrost masy korzeniowej lub nagromadzanie biomasy roślin. Preparaty mikrobiologiczne zawierają głównie wolno żyjące bakterie oraz grzyby, w tym grzyby mikoryzowe, które izolowane są z gleby, roślin, wody czy przekompostowanego obornika. Do stymulatorów mikrobiologicznych zalicza się m.in. wspomagające

wzrost roślin *Rhizobacteria* (PGPR – *plant-growth promoting rhizobacteria*), pochodzące głównie z ryzosfery. Obecnie znanych jest kilkadziesiąt szczepów PGPR (19, 23). Bakterie promujące wzrost i rozwój roślin należą do różnych grup filogenetycznych. Najliczniejszą grupę stanowią bakterie z rodzaju *Pseudomonas*, a także *Bacillus*, *Enterobacter* i *Erwinia* (3). Bakterie PGPR wpływają na wzrost roślin w sposób pośredni i bezpośredni. Pośredni sposób oddziaływania na rośliny związany jest z ochroną przed skutkami działania fitopatogenów (15). Bezpośrednia stymulacja polega na dostarczeniu roślinom składników mineralnych, syntezie fitohormonów pobudzających wzrost roślin, podobnych do hormonów roślinnych, np. auksyn, giberelin, cytokinin bądź obniżeniu poziomu etylenu niekorzystnie wpływającego na ukorzenianie roślin (tab. 1). Gibereliny stymulują kiełkowanie nasion, wzrost łodyg, indukują kwitnienie oraz rozwój kwiatów. Pobudzają wzrost korzenia oraz włośników korzeniowych. Związki te produkowane są m.in. przez *Acetobacter diazotrophicus*, *Herbaspirillum seropedicae*, *Bacillus* oraz *Azospirillum*. Kwas indoliloctowy (IAA) z grupy innych hormonów roślinnych (auksyn) jest powszechnym produktem syntetyzowanym przez bakterie PGPR. Bierze prawdopodobnie udział w nawiązywaniu kontaktu bakterii z rośliną (31). Może również wspomagać działanie auksyn roślinnych we wzroście korzenia poprzez bezpośredni wpływ na podziały i wydłużanie komórek roślinnych. Niski poziom bakteryjnego IAA pobudza wydłużanie korzeni, natomiast wysoki poziom stymuluje tworzenie korzeni bocznych i przybyszowych. Ponieważ zmiany endogennej puli fitohormonów roślinnych pod wpływem bakterii PGPR skutkują przyrostem masy korzeniowej, zwiększona zostaje tym samym powierzchnia kontaktowa rośliny z glebą, co ułatwia dostępność i bardziej skuteczne pobieranie składników pokarmowych (27).

Tabela 1

Stymulacja wzrostu roślin przez PGPR

Działanie pośrednie	Działanie bezpośrednie
– biologiczne zwalczanie patogenów: konkurencja o miejsce na korzeniu, ograniczenie dostępności żelaza dla patogenów przez wiązanie w siderofory, synteza metabolitów przeciwgrzybowych, produkcja antybiotyków, produkcja enzymów lizujących ściany komórkowe grzybów; – indukowanie odporności systemicznej (ISR).	– produkcja fitohormonów odpowiadających: giberelinom, auksynom, cytokininom; – obniżanie poziomu acetyleny w roślinach przez bakteryjną dezaminazę ACC; – zwiększanie pobierania związków mineralnych: ułatwianie pobierania azotu rozpuszczanie związków fosforu, wiązanie żelaza przez siderofory.

Źródło: Kalitkiewicz i Kępczyńska, 2008 (19)

Poprawa stanu odżywienia roślin pod wpływem stosowania inokulantów mikrobiologicznych zachodzi również poprzez zwiększenie puli azotu glebowego, pochodzącego z wiązania azotu atmosferycznego przez tzw. bakterie diazotroficzne. Zawierają one nitrogenazę – enzym, który redukuje azot atmosferyczny do jonu amonowego. Bakterie o zdolności do wiązania azotu atmosferycznego asymbiotycznie to np.: *Azoarcus*, *Pantoea agglomerans*, *Azotobacter*, *Azospirillum*, *Bacillus polymyxa* czy *Herbaspirillum* (3). Z doniesień naukowych wynika, że w korzystnych dla bakterii warunkach glebowych, około 7-12% całkowitego azotu pobranego przez pszenicę stanowić może właśnie azot związany przez *Azospirillum brasilense* i *Azospirillum lipoferum* (1). Bakterie PGPR mają wpływ na gospodarkę azotową nie tylko poprzez zdolność wiązania azotu atmosferycznego, ale również poprzez stymulację systemów transportujących NO_3^- u roślin.

Składnikiem niezbędnym do prawidłowego wzrostu i rozwoju roślin jest również żelazo. PGPR mają zdolność wiązania żelaza z ryzosfery dzięki produkcji związków chelatujących, tzw. sideroforów, a tym samym kontrolowania puli żelaza pobieranego przez rośliny (20). Siderofory takie jak piowerdyna, piochelina i jej prekursor – kwas salicylowy produkuje wiele szczepów *Pseudomonas* (37).

Niektóre mikroorganizmy zwiększają przyswajalność wybranych składników pokarmowych w glebie poprzez wzrost ich rozpuszczalności. *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Streptomyces*, *Azospirillum* czy *Flavobacterium* mają zdolność zwiększania rozpuszczalności fosforu (3). Fosfor jest łatwo wiązany przez cząsteczki glebowe i unieruchamiany, przez co staje się niedostępny dla roślin. Główne mechanizmy, za pomocą których bakterie powodują rozpuszczalność fosforu w glebie, to produkcja kwasów organicznych oraz enzymów fosfataz, uwalniających fosfor organiczny. Kwasy organiczne wydzielane przez mikroorganizmy rozpuszczają również potas zawarty w minerałach, takich jak mika czy illit, bądź chelatują jony krzemowe do form przyswajalnych przez rośliny.

Preparaty mikrobiologiczne mogą być dodawane do nawozów w celu zwiększenia skuteczności działania składników pokarmowych zawartych w tych ostatnich. Skuteczność preparatów mikrobiologicznych zależy w dużej mierze od gatunku roślin, pod które są stosowane. Rośliny produkują bowiem różne wydzieliny korzeniowe, wspomagające aktywność inokulowanych mikroorganizmów, stanowiąc często substrat do tworzenia substancji aktywnych biologicznie wytwarzanych przez mikroorganizmy.

Kwasy humusowe

Kwasy humusowe oddziałują na wzrost roślin w sposób bezpośredni i pośredni. Udowodniono ścisłą zależność pomiędzy zawartością substancji humusowych w glebie a plonowaniem roślin (29). Substancje humusowe powodują wzrost pojemności wodnej gleby, poprawiają jej strukturę, zwiększają jej aktywność mikrobiologiczną, przez co wpływają na lepsze pobieranie składników pokarmowych (35).

Przy wyczerpywaniu puli substancji humusowych z gleby, wzrasta zapotrzebowanie roślin na składniki wnoszone w nawozach mineralnych. Kwasy humusowe zwiększają przyswajalność fosforu, magnezu, żelaza i cynku dla roślin (15, 18).

Bezpośredni efekt stymulujący kwasów humusowych polega na zmianach w metabolizmie roślin, po zaabsorbowaniu przez ich tkanki makromolekuł – kwasów huminowych (HAs) i fulwowych (FAs) (21). Kwasy huminowe mają bezpośredni wpływ na błony komórkowe, powodują wzrost ich przepuszczalności, a tym samym skuteczniejszy transport związków mineralnych do miejsc aktywnych metabolicznie (6). Po ich wnikięciu do komórek, następuje wzrost intensywności oddychania komórkowego oraz wzmoczenie procesów podziałów komórkowych. Dzięki tym samym mechanizmom, HAs i FAs wpływają korzystnie na kiełkowanie nasion i rozwój siewek (34). Należy jednak podkreślić, że zbyt duże stężenie kwasów huminowych i fulwowych może mieć działanie toksyczne, powodujące zahamowanie procesu kiełkowania lub zamierania siewek.

HAs i FAs silnie oddziałują na rozwój korzeni, dlatego też często określa się je jako stymulatory wzrostu korzeni (13). Korzenie, liście i inne wzrastające części młodych roślin silniej reagują na działanie kwasów humusowych w porównaniu z roślinami starszymi, ze względu na intensywnie zachodzące procesy podziałów komórkowych oraz sprawniejszy transport niezbędnych składników mineralnych do miejsc aktywnych metabolicznie. Dlatego aplikacja kwasów huminowych i fulwowych na młode rośliny jest bardziej efektywna w porównaniu z aplikacją stosowaną w późniejszych fazach rozwojowych. U młodszych roślin obserwuje się zatem silniejszą reakcję wzrostową w porównaniu z roślinami starszymi. Doniesienia naukowe wskazują również, że dolistna aplikacja kwasów humusowych jest znacznie bardziej efektywna aniżeli doglebowa (26).

Zastosowanie kwasów humusowych do gleby powoduje bezpośrednie pobieranie HAs i FAs przez korzenie roślin, gdzie zatrzymywana jest znaczna ich część. Dopiero kiedy stężenie kwasów huminowych i fulwowych w tej części rośliny osiągnie właściwy poziom, transportowane są one do pędów i liści. U większości roślin jest to zaledwie 5-30% ogólnej puli kwasów humusowych pobranych przez korzenie (26).

Substancje humusowe, zwłaszcza kwasy fulwowe, aplikowane dolistnie wpływają korzystnie na zawartość chlorofilu w roślinach. HAs i FAs powodują wzrost mRNA w komórkach, który niezbędny jest w wielu procesach biochemicznych zachodzących wewnątrz komórek. Aktywacja procesów biochemicznych powoduje wzmoczenie syntezy niektórych enzymów, a tym samym zawartości białek nośnikowych i strukturalnych w liściach.

Niektóre molekuły wchodzące w skład substancji humusowych wpływają na gospodarkę hormonalną roślin. Zarówno kwasy huminowe, jak i fulwowe działają jak inhibitory enzymu powodującego rozkład kwasu indolilo-3-octowego (IAA), regulującego wzrost i rozwój roślin (24). Regulując gospodarkę hormonalną roślin, determinują również reakcję obronną roślin na niekorzystne warunki środowiska, w tym stres suszy czy niskie temperatury (25, 28).

Wyciągi z wodorostów morskich

Algi morskie są bogate w makro- i mikroelementy, aminokwasy i witaminy. Niektóre z nich, szczególnie algi czerwone i brązowe są źródłem niespotykanych u innych roślin związków. Brązowe algi *Ascophyllum nodosum*, *Fucus vesiculosus* i *Saccharina longicruris* zawierają laminarynę i alginian. Laminaryna jest polisacharydem pełniącym funkcję materiału zapasowego, stymuluje naturalną odporność roślin i bierze udział w aktywacji genów odpowiedzialnych za syntezę białek związanych z patogenezą. Alginian jest składnikiem ścian komórkowych, tworzącym strukturę wiążącą wodę, przez co zapobiega wysuszeniu roślin przy wystawieniu na bezpośrednie działanie powietrza, np. podczas odpływu (22, 38).

Testy roślinne wskazują na obecność w glonach, poza substancjami odżywczymi, więcej niż jednej grupy substancji czynnych działających stymulująco na rośliny. Niewątpliwie są to również regulatory wzrostu, wśród których znajdują się wspomniane już hormony roślinne – auksyny, cytokininy czy kwas abscysynowy.

Cytokininy występują zarówno w żywych algach, jak i ich ekstraktach. Stymulują kiełkowanie nasion, regulują tempo podziałów komórkowych oraz procesy starzenia się roślin poprzez hamowanie rozkładu białek. Pod wpływem ekstraktów z alg, zwiększa się poziom cytokinin zarówno w korzeniach, jak i w częściach nadziemnych, w tym w organach generatywnych (32). Wyciągi z alg wzmagają proces mobilizacji cytokinin z korzeni do tworzących się owoców bądź zwiększają syntezę egzogennej cytokinin w owocach. Wyciągi z alg wyjątkowo korzystnie wpływają na rozwój systemu korzeniowego. Udowodniono, że ekstrakt z brunatnicy *Ecklonia maxima* wykazywał efekt stymulujący rozwój korzeni niektórych roślin porównywalny z działaniem samych auksyn (17). Siła oddziaływania ekstraktów z alg na wzrost i rozwój korzeni jest największa w przypadku młodych roślin. Wyciągi z glonów wpływają zarówno na wzrost stosunku masy korzeni do części nadziemnych, jak również na nagromadzanie biomasy, niezależnie od tego czy stosowane są doglebowo, czy też w formie oprysku nalistnego. Produkty na bazie alg zwiększają zawartość chlorofilu w liściach, a tym samym wzmagają aktywność fotosyntetyczną, co przekłada się na wielkość plonów (4). Dużą rolę odgrywa tu obecna w algach betaina, chroniąca chloroplasty przed degradacją. U większości roślin substancje czynne zawarte w ekstraktach z alg powodują przyspieszenie kwitnienia i tworzenia owoców, przy czym nie jest to związane z reakcją roślin na działanie czynników stresowych (4).

Chemizm bioaktywnych związków występujących w algach oraz fizjologiczny mechanizm ich działania w zmniejszaniu skutków czynników stresowych nie zostały dogłębnie rozpoznane. Niemniej jednak na podstawie istniejącego stanu wiedzy można wnioskować, że dużą rolę odgrywa tu aktywność cytokinin.

Hydrolizaty białkowe i aminokwasy

Rośliny są zdolne do pobierania aminokwasów i peptydów zarówno poprzez liście, jak i system korzeniowy. Mieszaniny aminokwasów i peptydów pozyskiwane są przez chemiczną lub enzymatyczną hydrolizę półproduktów pochodzenia przemysłowego lub rolniczego, z surowców roślinnych (resztki pozbiorowe np. łubinu, lucerny, glikoproteidy ściany komórkowej *Nicotiana*, białka izolowane z alg) lub zwierzęcych (kolagen, elastyna, tkanki nabłonkowe) (2, 5, 16). Mimo, że preparaty na bazie produktów białkowych mogą zawierać spore ilości azotu, efekt biostymulujący nie wynika bezpośrednio z odżywczego działania zawartego w tych związkach azotu.

Biostymulatory z tej grupy można podzielić na hydrolizaty białkowe zawierające mieszaninę peptydów i aminokwasów oraz na preparaty na bazie wolnych aminokwasów, takich jak glutamina, prolina czy betaina. Stymulujący wpływ hydrolizatów białkowych na rośliny polega przede wszystkim na usprawnieniu metabolizmu węgla i azotu oraz zwiększeniu asymilacji azotu (7). Wolne, lewoskrętne aminokwasy odgrywają rolę w regulacji pobierania azotu przez korzenie. Kwas asparaginowy, treonina i fenyloalanina stymulują kiełkowanie nasion, arginina wzmacnia odporność roślin na niskie temperatury, jest związkiem niezbędnym do zapoczątkowania podziałów komórkowych w tkankach roślinnych. Glicyna oraz lizyna stanowią czynniki chelatujące, odgrywają ważną rolę w procesie formowania komórek roślinnych oraz syntezie chlorofilu. Seryna, tryptofan i walina są prekursorami hormonów roślinnych – auksyn, które regulują wzrost korzeni oraz części nadziemnych, jak również sterują różnicowaniem się tkanek ksylemu przewodzącego wodę od korzeni w górę rośliny (14, 36). Preparaty na bazie aminokwasów zwiększają również odporność roślin na niekorzystne warunki środowiska. Glicyna, betaina i prolina działają ochronnie na enzymy, białka i błony komórkowe w warunkach wysokiej temperatury oraz silnego promieniowania słonecznego. Dlatego akumulacja tych aminokwasów w roślinie jest skorelowana ze wzrostem tolerancji na niekorzystne czynniki środowiskowe u takich roślin jak kukurydza, jęczmień, soja, lucerna czy ryż. Arginina odgrywająca istotną rolę w transporcie azotu w roślinie, również magazynowana jest w większych ilościach w warunkach stresowych (1, 9).

Aminokwasy i peptydy zwiększają tolerancję roślin w stosunku do zanieczyszczeń metalami ciężkimi. Przy dużym stężeniu jonów metali ciężkich w glebie indukowana jest synteza proliny w roślinach. Aminokwas ten pełni funkcję osmoregulacyjną poprzez wyrównanie deficytu wody, który towarzyszyć może roślinom w warunkach ekspozycji na metale ciężkie. Prolina zdolna jest do chelatowania jonów wewnątrz komórek roślinnych i w soku ksylemowym. Może również odgrywać rolę antyoksydanta, chroniąc komórki przed negatywnym oddziaływaniem wolnych rodników. W chelatowaniu takich jonów jak cynk, nikiel, arsen i kadm ważną rolę odgrywają również inne wolne aminokwasy jak asparagina, glutamina i cysteina (30, 33).

Skuteczność w uprawie roślin polowych

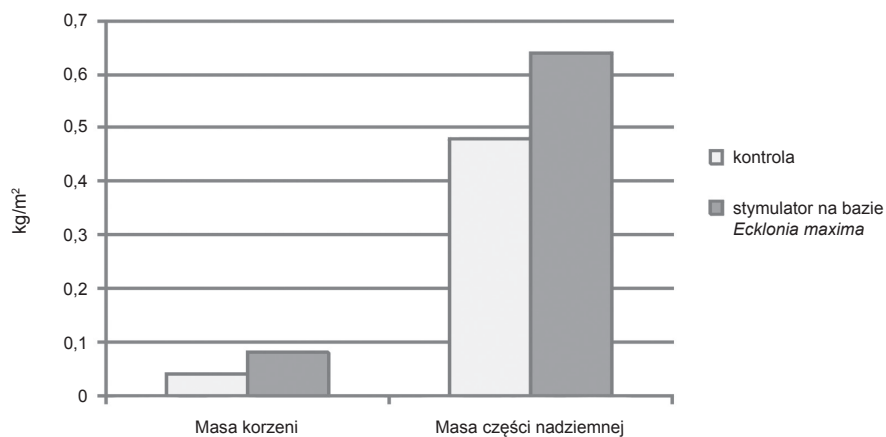
Zgodnie z obowiązującymi przepisami prawnymi (11), IUNG-PIB w Puławach prowadzi badania nad oceną wpływu stymulatorów na wzrost i plonowane roślin uprawy polowej, celem uzyskania pozwolenia Ministra Rolnictwa i Rozwoju Wsi na wprowadzenie do obrotu w Polsce. Wszystkie doświadczenia, w których badana była skuteczność przytaczanych w tym opracowaniu biostymulatorów, prowadzone były na glebach w dobrej kulturze, zgodnie z przyjętą technologią uprawy danego gatunku. Działanie tych preparatów ma bowiem wspomagać wzrost i rozwój roślin, ograniczając niemożliwe do przewidzenia niekorzystne warunki atmosferyczne, nie niwelując jednak zaniedbań wynikających z dbałości o stan gleby. Poniżej przedstawiono wyniki badań nad stymulatorami wzrostu na bazie wyciągów roślinnych, kwasów humusowych oraz aminokwasów, które prowadzone były w Rolniczym Zakładzie Doświadczalnym IUNG-PIB w Grabowie (woj. mazowieckie).

W 2010 r. prowadzono doświadczenie nad wpływem stymulatora wzrostu na bazie wyciągu alg *Ecklonia maxima* na wzrost i rozwój jęczmienia jarego odmiany Skarb. Gleba charakteryzowała się odczynem optymalnym dla jęczmienia, wysoką zasobnością w fosfor oraz niską w potas i magnez przyswajalny. Oprysk testowanym preparatem stosowany był jednorazowo, w dawce 2 l/ha w fazie pięciu liści. Jęczmień traktowany stymulatorem charakteryzował się znacznie większą masą korzeniową oraz biomasa nadziemną w porównaniu z obiektem kontrolnym, w którym nie stosowano oprysku stymulatorem (rys. 1). Rośliny dłużej zachowały aktywność fotosyntetyczną, dzięki wzmożonemu nagromadzeniu chlorofilu oraz ochronie przed jego degradacją, o czym świadczą wyższe odczyty SPAD w stosunku do kontroli (rys. 2). W doświadczeniu, w obiekcie kontrolnym jęczmień plonował na poziomie 4,51 t/ha, a w obiekcie, w którym stosowano oprysk stymulatorem – na poziomie 5,13 t/ha.

Korzystny efekt w uprawie zbóż uzyskano również po zastosowaniu stymulatora wzrostu na bazie kwasów humusowych, pozyskiwanych z węgla brunatnego oraz torfu. W warunkach przeprowadzonego w sezonie wegetacyjnym 2012/2013 doświadczenia z pszenicą ozimą odmiany Figura, na glebie o odczynie obojętnym, bardzo wysokiej zasobności w fosfor, potas oraz magnez, zastosowano nawożenie mineralne jak poniżej:

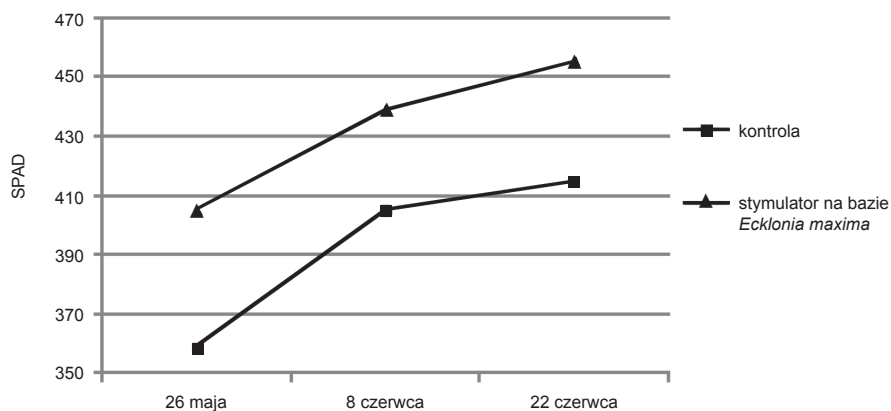
1. Kontrola (bez oprysku stymulatorem) – 60 kg P_2O_5 , 90 kg K_2O i 170 kg N/ha.
2. Oprysk stymulatorem na bazie kwasów humusowych – 60 kg P_2O_5 , 90 kg K_2O i 170 kg N/ha.
3. Oprysk stymulatorem na bazie kwasów humusowych – 30 kg P_2O_5 , 45 kg K_2O i 85 kg N/ha.

Preparat stosowano w łącznej dawce 16 l/ha:5 l/ha w następujących fazach rozwojowych pszenicy: pęd główny i dwa pędy boczne, początek strzelania w źdźbło, widoczne drugie kolanko oraz 1 l/ha w fazie pełni kłoszenia.



Rys. 1. Wpływ stymulatora wzrostu na bazie wyciągu z *Ecklonia maxima* na plon suchej masy korzeni i części nadziemnej jęczmienia jarego odmiany Skarb w fazie kłoszenia

Źródło: opracowanie własne



Rys. 2. Wpływ oprysku stymulatorem wzrostu na bazie wyciągu z *Ecklonia maxima* na wartość indeksu zieloności liścia jęczmienia jarego odmiany Skarb w kolejnych terminach pomiarów (termin aplikacji stymulatora – 11 maja)

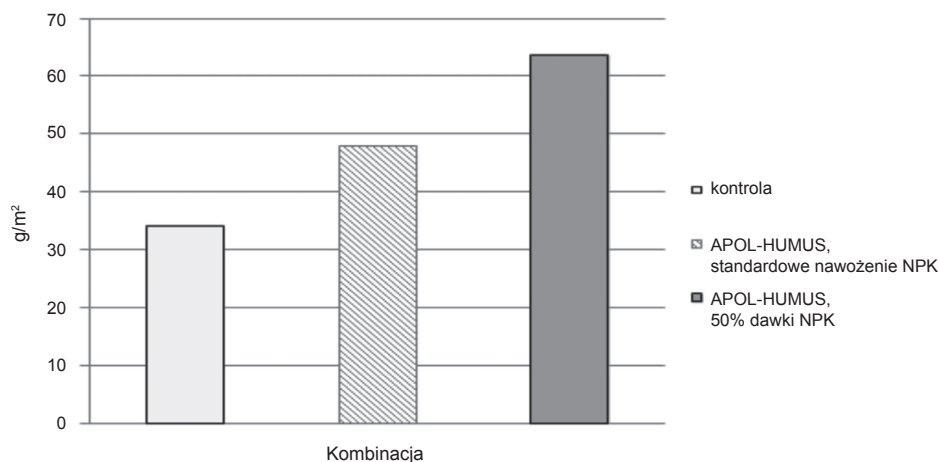
Źródło: opracowanie własne



Fot. 1. Wpływ stymulatora na bazie kwasów humusowych na przyrost korzeni w fazie kłoszenia pszenicy

Źródło: opracowanie własne

Oprysk badanym preparatem stymulował wzrost korzeni pszenicy. W fazie kłoszenia masa korzeni roślin traktowanych stymulatorem była większa od roślin kontrolnych o 60% (fot. 1, rys. 3). Rośliny nagromadzały również więcej biomasy nadziemnej.



Rys. 3. Wpływ stymulatora wzrostu APOL-HUMUS na wielkość plonów suchej masy korzeni w fazie kłoszenia pszenicy

Źródło: opracowanie własne

Rośliny traktowane stymulatorem charakteryzowały się większym wigorem, liście pozostawały dłużej zielone na skutek zwiększenia zawartości chlorofilu. W efekcie dłużej wykazywały aktywność fotosyntetyczną, co przełożyło się na zwyżkę

plonów ziarna. W obiekcie kontrolnym plony ziarna pszenicy osiągnęły 5,6 t/ha, takie same plony uzyskano w obiekcie, w którym zredukowano o połowę nawożenie NPK, ale rośliny traktowano stymulatorem. Aplikacja stymulatora przy standardowym nawożeniu mineralnym pozwoliła na uzyskanie plonów na poziomie 6,2 t/ha.

W sezonie wegetacyjnym 2012/2013 przeprowadzono badania określające wpływ stymulatora wzrostu na bazie aminokwasów na wzrost i plonowanie rzepaku ozimego odmiany Californium. Gleba wykazywała odczyn obojętny, bardzo wysoką zasobność w fosfor, potas oraz magnez. Doświadczenie prowadzono zgodnie z podanym niżej schematem:

1. Kontrola (bez oprysku stymulatorem).
2. Oprysk stymulatorem na bazie aminokwasów w dawce 5 l/ha (4 x 1,25 l/ha).
3. Oprysk stymulatorem wzrostu na bazie aminokwasów w dawce 6 l/ha (4 x 1,5 l/ha).
4. Oprysk stymulatorem na bazie aminokwasów w dawce 12 l/ha (4 x 3,0 l/ha).

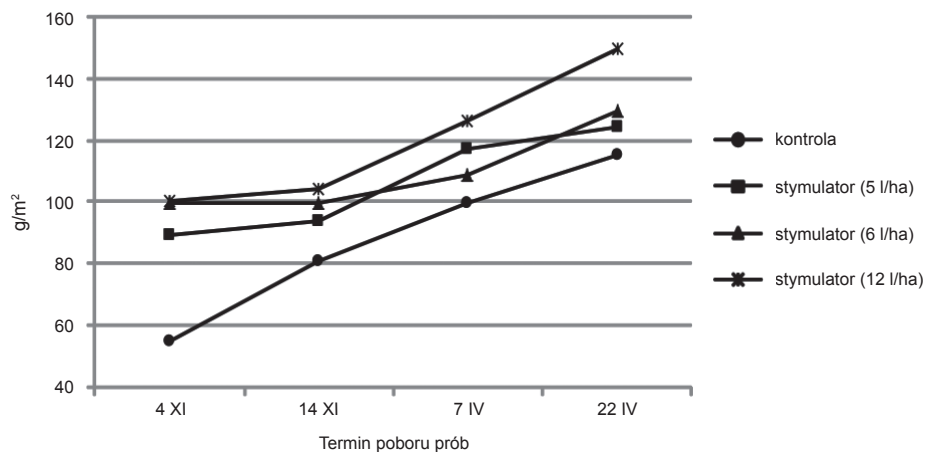
Stymulator aplikowano w następujących fazach rozwojowych: faza drugiego liścia (I dawka), jedenastego liścia (II dawka), początek powstawania pąków (III dawka).

W każdym z terminów poboru prób system korzeniowy roślin traktowanych stymulatorem był lepiej rozwinięty w porównaniu z roślinami kontrolnymi (fot. 2, rys. 4). Preparat z aminokwasami powodował również przyrost masy nadziemnej rzepaku, przy czym w całym okresie wegetacji rośliny tworzyły tym więcej biomasy, im większą dawkę oprysku zastosowano (rys. 5). Oprysk testowanym stymulatorem wzrostu powodował wzrost plonów ziarna jęczmienia w stosunku do kontroli średnio o 15% (rys. 6).



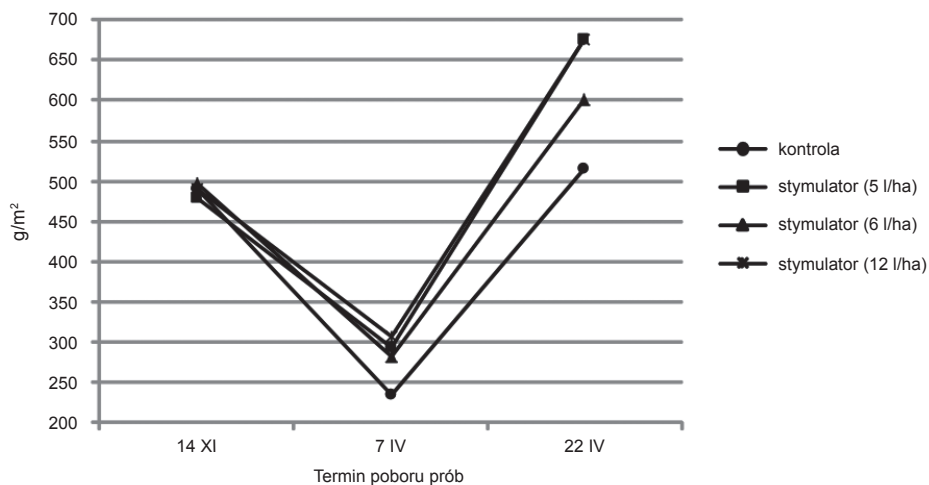
Fot. 2. Wpływ stymulatora wzrostu na bazie aminokwasów na rozwój systemu korzeniowego rzepaku ozimego 21 dni po aplikacji pierwszej dawki preparatu (pobór prób – 4 października 2013 r.)

Źródło: opracowanie własne



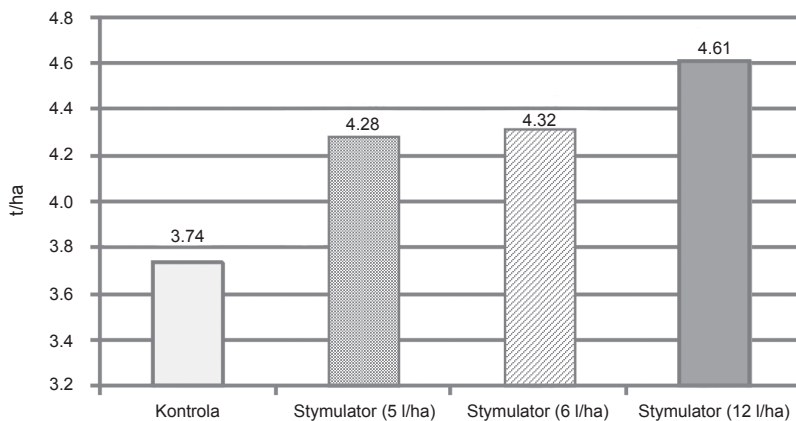
Rys. 4. Wpływ stymulatora wzrostu na bazie aminokwasów na przyrost suchej masy korzeni rzepaku w terminach poboru prób

Źródło: opracowanie własne



Rys. 5. Wpływ stymulatora wzrostu na bazie aminokwasów na przyrost suchej masy części nadziemnej rzepaku w terminach poboru prób

Źródło: opracowanie własne



Rys. 6. Wpływ stymulatora wzrostu na bazie aminokwasów na wielkość plonów ziarna jęczmienia jarego odmiany Skarb

Źródło: opracowanie własne

Podsumowanie

Stymulatory wzrostu, bez względu na skład i pochodzenie, mają na celu usprawnić podstawowe biochemiczne procesy zachodzące w roślinie i glebie, a przez to wpłynąć pozytywnie na wzrost i rozwój roślin oraz złagodzić skutki niekorzystnych warunków środowiska. Preparaty zawierające substancje stymulujące nie zastępują nawożenia, mogą jedynie wpływać korzystnie na wykorzystanie zawartych w nawozach składników pokarmowych, głównie dzięki lepiej rozwiniętemu systemowi korzeniowemu roślin. Pomimo zawartości składników pokarmowych, nie można traktować ich jako produktów nawozowych i stosować w dawkach większych niż zalecane, ponieważ mogą oddziaływać toksycznie na rośliny. Z badań własnych oraz wyników innych autorów cytowanych w tej pracy wynika, że zwiększa plonów roślin uprawnych pod wpływem stosowania biostymulatorów waha się w granicach od kilku do kilkunastu procent, zależnie od zawartej w preparacie substancji czynnej oraz warunków glebowo-klimatycznych w danym sezonie wegetacyjnym poszczególnych upraw.

Literatura

1. Ahmad R., Lim C.J., Kwon S.Y.: Glycine betaine: a versatile compound with great potential for gene pyramiding to improve crop plant performance against environmental stresses. *Plant Biotechnol. Rep.*, 2013, **7**: 49-57.
2. Apone F., Tito A., Carola A., Arciello S., Tortora A., Fillippini L., Monoli I., Cucchiara M., Gibertoni S., Chrispeels M.J., Colucci G.: A mixture of peptides and sugars derived from plant cell walls increases plant defense responses to stress and attenuates ageing – associated molecular changes in cultured skin cells. *J. Biotechnol.*, 2010, **145**: 367-376.
3. Bhattacharyya P.N., Jha D.K.: Plant growth – promoting rhizobacteria (PGPR): emergence in agriculture. *World J. Microbiol. Biotechnol.*, 2012, **28**: 1327-1350.
4. Blunden G., Cripps A. L., Gordon S. M., Mason T. G., Turner C.H.: The characterization and quantitative estimation of betaines in commercial seaweeds extracts. *Bot. Mar.*, 1986, **29**: 155-160.
5. Calvo P., Nelson L., Kloepper J.W.: Agricultural uses of plant biostimulants. *Plant Soil.*, 2014, **383**: 3-41.
6. Chen Y., Clapp C.E., Magen H.: Mechanisms of plant growth stimulation by humic substances: the role of organo iron complexes. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 2004, **50**: 1089-1095.
7. Colla G., Rouphael Y., Canaguier R., Svecova E., Cardarelli M.: Biostimulant action of a plant-derived protein hydrolysate produced through enzymatic hydrolysis. *Front. Plant Sci.*, 2014, **5**: 1-6.
8. Commission Regulation (EU) amending Regulation (EC) No 2003/2003 of the European Parliament and of the Council relating to the fertilizer for the purposes of adapting Annexes I and IV (Project).
9. dos Reis S.P., Lima A.M., de Souza C.R.B.: Recent molecular advances on downstream plant responses to abiotic stress. *Int. J. Mol. Sci.*, 2012, **13**: 8628-8647.
10. Dz. U. nr 147, poz. 1033, 2007: Ustawa z dnia 10 lipca 2007 r. o nawozach i nawożeniu.
11. Dz. U. nr 117, poz. 765, 2008: Rozporządzenie Ministra Rolnictwa i Rozwoju Wsi z dnia 18 czerwca 2008 r. w sprawie wykonania niektórych przepisów ustawy o nawozach i nawożeniu.
12. Dz. Urz. WE, 24.11.2009: Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (WE) nr 1107/2009 z dnia 21 października 2009 r. dotyczące wprowadzania do obrotu środków ochrony roślin i uchylające dyrektywy Rady 79/117/EWG i 91/414 EWG.
13. Eyheraguibel B., Silvestre J., Morard P.: Effects of humic substances derived from organic waste enhancement on the growth and mineral nutrition of maize. *Bioresour Technol.*, 2008, **99**: 4206-4212.
14. Forde B.G.: Lea PJ Glutamate in plants: metabolism, regulation, and signalling. *J. Exp. Bot.*, 2007, **58**: 2339-2358.
15. Glick B.R., Todorovic B., Czarny J., Cheng Z., Duan J.: Promotion of plant growth by bacterial ACC deaminase. *Crit. Rev. Plant. Sci.*, 2007, **26**: 227-242.
16. Halpern M., Bar-Tal A., Ofek M., Minz D., Muller T., Yermiyahu U.: The use of biostimulants for enhancing nutrient uptake. In Sparks D. L. (ed.) *Advances in Agronomy*, 2015, **129**: 141-174.

17. Jeannin I., Lescure J.C., Morot-Gaudry I.F.: The effects of aqueous seaweed sprays on the growth of maize. *Bot. Mar.*, 1991, **34**: 469-473.
18. Jones C.A., Jeffrey S.J., Mugaas A.: Effect of low rate commercial humic acid on phosphate availability, micronutrient uptake, and spring wheat yield. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.*, 2007, **38**: 921-933.
19. Kalitkiewicz A., Kępczyńska E.: Wykorzystanie ryzobakterii do stymulacji wzrostu roślin. *Biotechnologia*, 2008, **2(81)**: 102-114.
20. Khan A.G.: Role of soil microbes in the rhizospheres of plants growing on trace metal contaminated soils in phytoremediation. *J. Trace Elem. Med. Biol.*, 2005, **18**: 355-364.
21. Magdoff F., Weil R.R.: Soil organic matter in sustainable agriculture. CRC Press, 2004, Upper Saddle River.
22. Mancuso S., Azzarello E., Mugnai S., Briand X.: Marine bioactive substances (IPA extract) improve ion fluxes and water stress tolerance in potted *Vitis vinifera* plants. *Adv. Hortic. Sci.*, 2006, **20**: 156-161.
23. Munees A., Mulugeta K.: Mechanisms and applications of plant growth promoting rhizobacteria: Current perspective. *Journal of King Saud University – Science*, 2014, **26(1)**: 1-20.
24. Nardi S., Pizzeghello D., Muscolo A., Vianello A.: Physiological effects of humic substances in higher plants. *Soil Biol. Biochem.*, 2002, **34**: 1527-1537.
25. Olivares F.L., Aguiar N.O., Rosa R.C.C., Canellas L.P.: Substrate biofortification in combination with foliar sprays of plant growth promoting bacteria and humic substances boosts production of organic tomatoes. *Sci. Hortic.*, 2015, **183**: 100-108.
26. Petit R.: Organic matter, humus, humate, humic acid, fulvic acid and humin: their importance in soil fertility and plant health, <http://www.humates.com/pdf/organicmatterPetit.pdf> (Data dostępu: 09.05.2015 r.).
27. Santner A., Calderon-Villalobos L.I.A., Estelle M.: Plant hormones are versatile chemical regulators of plant growth. *Nature Chem. Biol.*, 2009, **5**: 301-307.
28. Schiavon M., Pizzeghello D., Muscolo A., Vaccaro S., Francioso O., Nardi S.: High molecular size humic substances enhance phenylpropanoid metabolism in maize (*Zea mays* L.). *J. Chem. Ecol.*, 2010, **36**: 662-669.
29. Sharif M., Khattak R.A., Sarir M.S.: Effect of different levels of lignitic coal derived humic acid on growth of maize plants. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.*, 2002, **33**: 3567-3580.
30. Sharma S.S., Dietz K.J.: The significance of amino acids and amino acid-derived molecules in plant responses and adaptation to heavy metal stress. *J. Exp. Bot.*, 2006, **57**: 711-726.
31. Spaepen S., Vanderleyden J.: Auxin and plant – microbe interactions. *Cold Spring Harb. Perspect. Biol.*, 2011, **3(4)**: 1-13.
32. Stirk W.A., van Staden J.: Isolation and identification of cytokinins in a new commercial seaweed product made from *Fucus serratus* L., *J. Appl. Phycol.*, 1997, **9**: 327-330.
33. Sytar O., Kumar A., Latowski D., Latowski D., Kuczynska P., Strzałka K., Prasad M.N.V.: Heavy metal-induced oxidative damage, defense reactions, and detoxification mechanisms in plants. *Acta Physiol. Plant*, 2013, **35**: 985-999.

34. Tahir M.M., Khurshid M., Khan M.Z., Abbasi M.K., Hazmi M.H.: Lignite-derived humic acid effect on growth of wheat plants in different soils. *Pedosphere*, 2011, **2**: 124-131.
 35. Ulukan H.: Effect of soil applied humic acid at different sowing times on some yield components of wheat (*Triticum* spp.) hybrids. *Int. J. Bot.*, 2008, **4(2)**: 164-175.
 36. Walch-Liu P., Liu L.H., Remans T., Tester M., Forde B.G.: Evidence that L-Glutamate can act as an exogenous signal to modulate root growth and branching in *Arabidopsis thaliana*. *Plant Cell Physiol.*, 2006, **47**: 1045-1057.
 37. Vansuyt G., Robin A., Briat J.F., Curie C., Lemanceau P.: Iron acquisition from Fe-pyoverdine by *Arabidopsis thaliana*. *Mol. Plant-Microbe Interact.*, 2007, **20**: 441-447.
 38. Vernieri P., Borghesi E., Ferrante A., Magnani G.: Application of biostimulants in floating system for improving rocket quality. *J. Food Agric. Environ.*, 2005, **3**: 86-88.
-

Adres do korespondencji:

dr Agnieszka Rutkowska
Zakład Żywienia Roślin i Nawożenia
IUNG-PIB
ul. Czarzoryskich 8
24-100 Puławy
tel. 81 47 86 840
e-mail: agrut@iung.pulawy.pl

Dorota Pikula

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

ROLA SUBSTANCJI HUMUSOWYCH ORAZ INNOWACYJNE PRODUKTY ZWIĘKSZAJĄCE ICH ZAWARTOŚĆ W GLEBIE*

Słowa kluczowe: kwasy huminowe, kwasy fulwowe, huminy, mikroorganizmy glebowe, węgiel brunatny

Wstęp

W Polsce czynniki naturalne, przede wszystkim specyfika klimatu, duży udział gleb piaszczystych oraz zakwaszenie gleb nie sprzyjają akumulacji i utrzymywaniu na stałym poziomie zawartości substancji humusowych, głównych składników glebowej materii organicznej (1, 27, 37, 38, 41, 47). W dodatku użytkowanie rolnicze, głównie orne, sprzyja szybkiej mineralizacji i stratom substancji humusowych z gleb. Najbogatsze w związki humusowe są powierzchniowe poziomy gleb (3, 6, 10). Ze względu na ogromną rolę związków humusowych w kształtowaniu struktury i właściwości gleb konieczne jest regularne uzupełnianie ubytków materii organicznej w warstwie ornej gleby. W latach 80. ubiegłego wieku utrzymanie dodatniego salda zawartości materii organicznej w glebach można było zapewnić dzięki regularnemu nawożeniu obornikiem oraz uprawie roślin w płodozmianach. Obecnie jest to trudne z powodu utrzymującego się od kilkunastu lat trendu uprawy roślin w monokulturach, głównie zbożowych, oraz spadku produkcji nawozów naturalnych. Obowiązująca we współczesnym rolnictwie zasada zrównoważonego nawożenia, zapewniającego utrzymanie gleby w stanie żyzności, wymaga zatem poszukiwania alternatywnych do obornika produktów wyprodukowanych na bazie substancji humusowych przeznaczonych do zwiększania zawartości materii organicznej w glebie (11, 25, 43).

Materia organiczna – naturalna i wprowadzona w nawozach oraz produkty jej przemian powstałe w wyniku działalności mikroorganizmów oddziałują korzystnie na właściwości fizyczne, chemiczne oraz biologiczne gleb (5, 6, 7, 10, 37, 41). Do głównych źródeł glebowej materii organicznej zalicza się: resztki roślinne w różnych stadiach rozkładu, nawozy naturalne (obornik, gnojowica, gnojówka) i organiczne

* Opracowanie wykonano w ramach zadania 2.2 w programie wieloletnim IUNG-PIB.

(komposty, wermikomposty) oraz rzadziej wykorzystywane w praktyce rolniczej: osady ściekowe, organiczne odpady komunalne, korę, słomę, torf, węgiel brunatny. W dążeniu do wzbogacenia gleb w materię organiczną, podjęto w ostatnich latach szereg badań mających na celu pozyskanie nowych, bezpiecznych dla środowiska i człowieka źródeł glebowej materii organicznej (11, 17, 18, 25, 26, 28, 29, 30).

Charakterystyka substancji humusowych

Substancje humusowe (SH) są głównym składnikiem materii organicznej, decydującym o różnych jej funkcjach i właściwościach (6, 7, 8, 10, 24, 28, 36, 44, 48). Stanowią ważne ogniwo w globalnym obiegu węgla. Dzięki zdolności do wiązania i neutralizowania substancji szkodliwych, toksyn i zanieczyszczeń, pełnią funkcję ochronną w środowisku (12, 20, 28). Substancje humusowe – bezpostaciowe produkty przemian materiału organicznego różnego pochodzenia, tworzą naturalną mieszaninę brunatnych, amorficznych związków koloidalnych, względnie odpornych na mineralizację. W skład substancji humusowych wchodzi: kwasy huminowe (C_{KH}), kwasy fulwowe (C_{KF}) oraz huminy (C_H). Substancje te powstają w procesie humifikacji, polegającym na mikrobiologicznych i chemicznych procesach rozkładu resztek roślinnych oraz przebudowie i syntezie różnych związków organicznych prowadzących do powstania nowych substancji humusowych, zwanych próchnicą (humusem) (2, 10, 12, 13, 14, 36). Proces humifikacji definiowany jest także często jako „przedłużająca się stabilizacja materii organicznej”, ponieważ humifikacja prowadzi do odtworzenia substancji humusowych w glebie. Rozkład połączony z wytworzeniem prostych związków mineralnych, takich jak: CO_2 , H_2O , NH_3 oraz jonów (Ca^{2+} , K^+ , SO_4^{2-} , HPO_4^{2-} itp.). Proces ten nosi nazwę mineralizacji. Procesy humifikacji i mineralizacji zachodzą równocześnie i są ze sobą ściśle związane, produkty humifikacji włączane są do procesu mineralizacji i odwrotnie. Przyjmuje się, że około 75-80% materii organicznej wprowadzanej corocznie do gleby (nawozy organiczne, resztki roślinne i zwierzęce) ulega procesom mineralizacji, a 20-25% przekształca się w swoiste substancje próchniczne (12). Ilość i jakość substancji humusowych powstałych w wyniku syntezy różnych związków organicznych zależą od typu gleby, nawożenia, składu ilościowego i jakościowego mikroorganizmów glebowych, temperatury, wilgotności, odczynu oraz ilości i jakości przetworzonego materiału organicznego (13, 14, 15, 16, 35). W literaturze szczególną rolę w procesie mineralizacji i humifikacji przypisuje się działalności mikroorganizmów (11, 20, 32, 33). Przyjmuje się, że sucha masa mikroorganizmów w glebach użytkowanych rolniczo wynosi od 110 do 1940 $kg \cdot ha^{-1}$. Znaczna część mikroorganizmów jest aktywna jedynie w określonych warunkach fizykochemicznych gleby. Głównym czynnikiem ograniczającym ich aktywność jest zawartość świeżej masy organicznej (20).

Wyodrębnienie różniących się właściwościami trzech kategorii substancji humusowych: kwasów huminowych, kwasów fulwowych oraz humin, jest wynikiem

analitycznej procedury ich frakcjonowania, opartej na kryterium ich rozpuszczalności w selektywnie działających rozpuszczalnikach (7, 8, 14, 28, 40, 41). Każda z wydzielonych grup pełni w glebie określoną rolę.

Kwasy huminowe to grupa związków próchnicznych, charakteryzujących się barwą ciemnobrązową aż do czarnej, zawierająca ok. 58% węgla, nierozpuszczalna w kwaśnym środowisku. Kwasy fulwowe tworzą grupę związków o barwie żółtej do żółto-brązowej, która łatwo rozpuszcza się w wodzie w całym zakresie pH i zawiera ok. 55% węgla. Ta frakcja jest odpowiedzialna za wymywanie z gleby składników zasadowych, nie jest więc korzystna dla jakości próchnicy. Wysoką zawartością kwasów fulwowych charakteryzują się gleby leśne, natomiast w składzie gleb łąkowych i torfowych jest więcej kwasów huminowych. Huminy to grupa związków próchnicznych o barwie czarnej, nierozpuszczalnych w wodzie w całym zakresie pH. Huminy stanowią najważniejszą frakcję substancji humusowych, decydującą o stabilności próchnicy w glebie (7, 8, 9, 13).

Ważnym wskaźnikiem oceny jakości materii organicznej jest wartość stosunku $C_{KH}:C_{KF}$. Powszechnie przyjmuje się, że materia organiczna o wyższych od 1 wartościach tego stosunku charakterystyczna jest dla gleb żyzniejszych. Stosunek kwasów huminowych do fulwowych ($C_{KH}:C_{KF}$) wskazuje ponadto na kierunek transformacji substancji organicznej w glebie, pozwala ocenić stabilność próchnicy oraz oszacować zmiany zachodzące w glebie, spowodowane długoletnią uprawą różnych roślin w płodozmianach, monokulturą, regularnym stosowaniem lub brakiem nawozów naturalnych oraz mineralnych.

Substancje humusowe w glebach uprawnych

Liczne badania (3, 6, 12, 24) wskazują, że każda gleba ma swoisty rodzaj próchnicy, która różni się nie tylko składem ilościowym, ale i jakościowym substancji humusowych, jak również formą wiązania ich z mineralną częścią gleby. Postępująca intensyfikacja produkcji roślinnej wiąże się z wprowadzeniem uproszczonego zmianowania, bardzo często uprawy roślin zbożowych w monokulturze, co nie pozostaje bez znaczenia dla jakości próchnicy (39).

Wśród czynników agrotechnicznych wpływających na zasobność gleb w substancje próchniczne należy wymienić przede wszystkim nawożenie – naturalne, organiczne, mineralne, jak również uprawę różnych gatunków roślin w zmianowaniach oraz różnych technologiach produkcji. Wyniki wielu statycznych doświadczeń nawozowych potwierdzają, że systematyczne nawożenie organiczne i naturalne zwiększa w glebie zawartość materii organicznej oraz wpływa istotnie na jakość próchnicy mierzoną stosunkiem $C_{KH}:C_{KF}$ i właściwościami fizykochemicznymi gleb (16, 19, 23, 34, 37, 38, 47). W badaniach własnych prowadzonych w oparciu o dwa wieloletnie doświadczenia zlokalizowane w Rolniczych Zakładach Doświadczalnych IUNG-PIB, w Osinach – z różnymi systemami uprawy roślin, w których na powierzchni około 16 ha porównuje

się w jednakowych warunkach różne systemy gospodarowania: ekologiczny, integrowany i konwencjonalny w dwóch wariantach: uproszczone zmianowanie i monokultura pszenicy ozimej, a także w Grabowie – z dwoma zmianowaniami różniącymi się doбором roślin, pięcioma poziomami nawożenia obornikiem (0, 20, 40, 60 i 80 t·ha⁻¹) oraz czterema dawkami azotu mineralnego (0, 50, 100, 150 kg·ha⁻¹), wykazano, że rodzaj nawożenia, gatunek uprawianej rośliny oraz system produkcji wpływały istotnie na zmiany zawartości substancji humusowych w glebach frakcji kwasów huminowych i były związane ze zmianami zawartości materii organicznej w glebie (tab. 1 i 2). W składzie frakcyjnym badanych substancji humusowych gleb z doświadczenia w Grabowie (nawożonych obornikiem) oraz gleb z doświadczenia w Osinach (z ekologicznego systemu produkcji) przeważały frakcje węgla kwasów huminowych (C_{KH}) i węgla humin (C_H), które mają zdolność do stabilizowania próchnicy i decydują o wytworzeniu poziomów próchnicznych dużej miąższości. Nawożenie azotem mineralnym w zróżnicowanych dawkach nie wpływało na skład frakcyjny materii organicznej.

Tabela 1

Frakcje materii organicznej w zależności od zmianowania oraz nawożenia obornikiem i azotem mineralnym w glebach RZD w Grabowie (2011-2012)

Czynniki doświadczenia		% SOM	% C _{KF}	% C _{KH}	% C _H	C _{KH} :C _{KF}
Zmianowanie	A	1,15	19,0	25,2	59,4	1,40
	B	1,32	20,1	22,8	61,2	1,20
Dawka obornika (t·ha ⁻¹)	0	1,12	21,1	25,9	60,5	1,34
	20	1,17	19,2	26,9	61,5	1,51
	40	1,24	20,8	26,0	61,0	1,40
	60	1,33	20,4	24,6	63,2	1,31
	80	1,32	19,4	24,2	64,3	1,35
Dawka N (kg·ha ⁻¹)	0	1,20	21,6	27,0	57,8	1,37
	50	1,24	19,5	24,4	62,8	1,34
	100	1,25	19,3	24,6	62,8	1,37
	150	1,26	19,5	24,3	62,9	1,34

Źródło: opracowanie własne

W glebach w Osinach, w monokulturze pszenicy ozimej oraz w systemie konwencjonalnym (intensywne nawożenie minerale i organiczne) notowano zwiększony udział węgla frakcji kwasów fulwowych (C_{KF}), który był prawdopodobnie konsekwencją wzrostu szybkości mineralizacji materii organicznej kosztem bardziej stabilnych frakcji próchnicy – humin (C_H), co w rezultacie może prowadzić do zmniejszenia ilości materii organicznej w glebie. Natomiast w ekologicznym systemie produkcji notowano wyższy procentowy udział węgla frakcji kwasów huminowych (C_{KH}) oraz węgla humin (C_H) w puli całkowitej węgla organicznego (tab. 2).

Badania własne potwierdzają, że również dobór gatunków roślin w zmianowaniu miał wpływ na jakość próchnicy mierzoną stosunkiem węgla kwasów huminowych do węgla kwasów fulwowych ($C_{KH}:C_{KF}$). Gleby w zmianowaniu, w którym uprawiano mieszanke koniczyny czerwonej z trawami (B) charakteryzowały się niższym stosunkiem węgla kwasów huminowych do węgla kwasów fulwowych w porównaniu do gleb spod zmianowania bez tej rośliny (A). Niższy stosunek $C_{KH}:C_{KF}$ wynikał z dopływu większej ilości azotu do gleb w zmianowaniu z rośliną bobowatą, który wpływa na większe tempo mineralizacji próchnicy. Humifikacji próchnicy w tym zmianowaniu nie służyło także większe zakwaszenie gleby w porównaniu do zmianowania A, w którym nie uprawiano rośliny bobowatej.

Przeprowadzone w Osinach badania wykazały, że system uprawy roślin (ekologiczny, intensywny i monokultura) wpływał istotnie na jakość substancji humusowych oraz stabilność próchnicy. W składzie frakcyjnym badanych gleb spod monokultury pszenicy ozimej stwierdzono większy udział frakcji węgla kwasów fulwowych (C_{KF}) niż kwasów huminowych (C_{KH}). Najlepszą jakością próchnicy i większym stopniem humifikacji odznaczały się gleby w ekologicznym systemie produkcji, natomiast gorszą jakością i stabilnością próchnicy – gleby spod monokultury pszenicy ozimej oraz uproszczonego systemu produkcji, o czym świadczy znacznie niższy od 1 stosunek węgla kwasów huminowych do węgla kwasów fulwowych (2011 rok) (tab. 2.)

Tabela 2

Frakcje materii organicznej w zależności od systemu produkcji w glebach RZD
w Osinach (2011-2015)

System produkcji	% SOM	% C_{KF}	% C_{KH}	% CH	$C_{KH}:C_{KF}$
2011 r.					
Ekologiczny	1,51	17,4	24,8	55,7	1,43
Konwencjonalny	1,36	25,5	17,5	54,7	0,69
Monokultura	1,11	29,0	25,1	43,4	0,86
2015 r.					
Ekologiczny	1,51	21,0	25,4	51,3	1,21
Konwencjonalny	1,36	22,3	23,6	51,4	1,06
Monokultura	1,11	24,1	25,2	47,6	1,05

Źródło: opracowanie własne

Huminy są frakcją, która reprezentuje trwałe połączenia związków próchnicznych z mineralną fazą gleby (3, 12, 13, 28, 41, 45). Zawartość tej frakcji odzwierciedla intensywność procesu humifikacji, a jej ilość zmniejsza się w miarę natężenia procesów mineralizacji materii organicznej. W badanych glebach doświadczenia w Grabowie większy udział procentowy węgla frakcji humin w puli węgla organicznego stwierdzano we wszystkich obiektach nawożonych obornikiem oraz w zmianowaniu,

w którym jednym z jego członów jest mieszanka koniczyny z trawami (zmianowanie B). W doświadczeniu w Osinach największy udział procentowy frakcji humin otrzymano w ekologicznym systemie produkcji, a najniższy w glebach pod monokulturą pszenicy ozimej (tab. 1 i 2).

Wykorzystanie substancji humusowych w nawożeniu

Doświadczenia naukowe potwierdzają, że substancje humusowe pozytywnie wpływają na żyzność gleb oraz wzrost roślin, głównie ze względu na wysoką sorpcję wymienną kationów, zawartość tlenu i dużą pojemność wodną (6, 10, 20). Główną ich zaletą jest zwiększenie pojemności wodnej gleb lekkich, co sprawia, że zagrożenie suszą jest mniejsze. Zwiększają dostępność składników pokarmowych dla roślin (zmniejszają ich wypłukiwanie i zatrzymują w strefie korzeniowej), stymulują rozwój systemu korzeniowego oraz rozwój pożytecznych mikroorganizmów w glebie. Dodatkowo, substancje humusowe wiążąc się z minerałami ilastymi, kationami, polisacharydami z udziałem mikroorganizmów, nadają glebie gruzelkowatą strukturę, tworząc dobre stosunki wodne, powietrzne i lepszą przepuszczalność gleb. Tworząc natomiast kompleksy chelatowe z mikro- i makroelementami, sprawiają, że składniki pokarmowe są łatwiej przyswajalne dla roślin. Niska zawartość kwasów humusowych, szczególnie w glebach piaszczystych skutkuje słabym zatrzymywaniem w niej wody i składników mineralnych, które migrując w głąb profilu glebowego, stają się niedostępne dla korzeni roślin uprawnych (5, 12, 20).

W doświadczeniach naukowych skuteczność działania substancji humusowych na glebę i rośliny ocenia się na ogół, dodając do pożywek substancje humusowe wyekstrahowane z gleb, torfu, węgla brunatnego czy też kompostów lub testuje w badaniach polowych, stosując je w postaci oprysku roślin lub gleby (11, 26, 28, 29, 30). Badania naukowe i praktyka rolnicza potwierdzają, że substancje humusowe, które oprócz kwasów huminowych, kwasów fulwowych i humin zawierają także znaczne ilości składników pokarmowych, tj. potas, magnez i azot, wywierają korzystny wpływ na rozwój i plonowanie roślin, a ich stosowanie w dłuższym czasie poprawia również niektóre właściwości gleby. Bardzo często obserwuje się również wzrost masy korzeniowej, a w szczególności korzeni włośnikowych niezwykle ważnych w pobieraniu składników pokarmowych i wody. Korzenie roślin uprawianych na glebach, do których dodaje się substancje humusowe charakteryzują się lepszym wzrostem elongacyjnym i zachowują dłużej wigor, co sprawia, że roślina może pobierać wodę z głębszych warstw gleby i lepiej wykorzystuje składniki pokarmowe.

Substancje humusowe wyekstrahowane z węgla brunatnego, torfu, leonardytu lub oksyhumolitów są najczęściej wykorzystywane na glebach lżejszych, na których nie stosuje się obornika lub obornik i nawozy organiczne stosowane są w warunkach niedostatecznej ilości wody w glebie, przez co trudno ulegają rozkładowi (49). Zastosowanie preparatów z dodatkiem substancji humusowych stymuluje rozkład

świeżo wprowadzonej do gleby masy organicznej, a uwalniane w wyniku jej przemian składniki pokarmowe stają się szybciej dostępne dla roślin. Największe korzyści w postaci zwiększonego pobrania stwierdza się w przypadku: fosforu, azotu, a także magnezu i mikroelementów (11).

Substancje humusowe szczególnie korzystnie wpływają na rośliny uprawiane na glebach o uregulowanym odczynie, bogatych w wapń. Na takich glebach znaczny udział kwasów huminowych i ich form związanych z wapniem przyczynia się do stabilizacji materii organicznej gleby (24, 26).

Korzystne oddziaływanie substancji humusowych na rozwój systemu korzeniowego roślin ma ogromne znaczenie w uprawie polowej, szczególnie roślin jarych (11). Rośliny jare są szczególnie narażone na okresowe susze, które to znaczenie zmniejszają w efekcie plony tych roślin. Badania własne (niepublikowane) oceny skuteczności preparatów zawierających substancje humusowe, przeprowadzone w IUNG-PIB na zlecenie producentów, potwierdzają, że na glebach z aplikowanymi preparatami zawierającymi kwasy humusowe, rośliny jare wytwarzały dłuższy i lepiej rozwinięty system korzeniowy, a więc pobierały więcej wody z głębszej warstwy gleby, co sprawiało, że były odporniejsze na okresowe susze, a ich komórki zachowywały dłużej turgor. Ta cecha jest szczególnie pożądana w naszym klimacie, gdzie stosunkowo często mamy do czynienia z okresowym niedoborem wody i przewagę gleb lekkich, a więc bardziej narażonych na utratę wody w porównaniu do gleb cięższych, z większym kompleksem sorpcyjnym. Ponadto wykazano, że kukurydza, pszenica czy jęczmień plonowały pod wpływem tych substancji od 5 do nawet 25% (kukurydza) wyżej w porównaniu do obiektów kontrolnych, na których stosuje się standardowe nawożenie mineralne NPK.

Skuteczność tych preparatów jest zazwyczaj większa przy stosowaniu w formie oprysku na rośliny niż na glebę. Zastosowanie preparatów humusowych do zaprawy roślin lub oprysków prowadzi również do zwiększenia plonów oraz wzrostu odporności roślin na niekorzystne warunki glebowe i klimatyczne oraz choroby. Im bardziej odbiegające od normy warunki, tym większy efekt zastosowania związków humusowych (43). Preparaty zawierające kwasy huminowe, stosowane w formie oprysku dolistnego, mogą stymulować również wzrost łodyg roślin uprawnych. Wszystkie te pozytywne efekty uzyskuje się, stosując rozcieńczone roztwory preparatów humusowych. Roztwory bardziej stężone nie tylko nie dają pożądaných skutków, ale mogą ujemnie oddziaływać na wzrost i rozwój roślin (43). Z badań Instytutu Ogrodnictwa w Skierniewicach wynika, że wrażliwość roślin na działanie kwasów humusowych zależy zarówno od fazy rozwojowej, w jakiej preparat jest aplikowany, jak również od gatunku roślin. Szczególnie korzystnie pod ich wpływem poprawia się jakość warzyw, np. pomidora, którego owoce są bardziej wybarwione i szybciej dojrzewają (49).

Innowacyjne metody zwiększania zawartości materii organicznej w glebie

Zabiegi uprawowe i ograniczone stosowanie nawozów naturalnych w praktyce powodują szybką mineralizację i straty substancji humusowych z gleby (25, 26, 28, 29, 30). Z tego względu w badaniach naukowych wciąż poszukuje się nowych, bezpiecznych dla środowiska i człowieka źródeł materii organicznej. Jednym z nich może być odpadowy węgiel brunatny (18, 26, 28, 29, 30) w postaci miazgi, w formie nawozów organiczno-mineralnych bądź innych preparatów produkowanych na jego bazie, jak również torf (18, 25, 28, 29, 30). Węgiel brunatny posiada struktury chemiczne podobne do struktur próchnicy glebowej i jest źródłem związków organicznych zawierających duże ilości kwasów humusowych. Zastosowanie węgla brunatnego do zwiększania zasobów glebowej materii organicznej jest determinowane jego właściwościami: silnie porowata struktura, alkaliczny charakter popiołu węglowego, zdolność pochłaniania i wymiany jonów oraz powolna mineralizacja zawartej w nim substancji organicznej (25). Do nawozów wyprodukowanych na bazie węgla brunatnego (pył węglowy i pospółka, produkty uboczne przy wydobywaniu węgla) i torfu niskiego w stosunku wagowym 5:1 węgla brunatnego należy Rekulter – nawóz organiczno-mineralny, zawierający 85% węgla brunatnego. Z badań (25, 28, 29) wynika, że wprowadzony do gleby lekkiej ten niekonwencjonalny nawóz powodował ponad dwukrotny przyrost ogólnej zawartości węgla organicznego, który utrzymywał się przez cały okres prowadzonych badań oraz wzrost pojemności sorpcyjnej gleby lekkiej o 400% w stosunku do kombinacji bez tego nawozu. Po zastosowaniu Rekultera wzrosła też wartość pH (18, 29). Podobną zależność w swoich badaniach otrzymali Ma z u r i i n . (34). Jednak w przeprowadzonych przez nich badaniach zawartość węgla organicznego nie ulegała istotnym zmianom w działaniu następczym. Potwierdza to opinię o stosunkowo powolnej mineralizacji węgla brunatnego (26, 28, 42).

Poza węglem brunatnym oraz produktami wytworzonymi na jego bazie, źródłem materii organicznej mogą być nawozy organiczno-mineralne oparte na leonardytach. Są one końcowym efektem trwającego kilkadziesiąt milionów lat procesu humifikacji materii organicznej. Leonardyty to kopalina będąca formą pośrednią między torfem a węglem brunatnym. Stosując je, dostarczamy glebie bioaktywne kwasy humusowe. Przykładem nawozu, którego surowcem są leonardyty, jest Rosahumus. Jest to nawóz organiczno-mineralny, zawierający 85% kwasów humusowych oraz 12% K_2O oraz 0,6% żelaza. Otrzymuje się go w procesie alkalicznej ekstrakcji leonardyty. Preparat humusowy działa jak środek kondycjonujący glebę i biostymulator rozwoju roślin. Jest on zalecany na glebach o niskiej zawartości próchnicy, na których nie stosuje się obornika oraz w gospodarstwach stosujących uproszczony płodozmian, z przewagą roślin zbożowych.

W badaniach naukowych zwraca się uwagę również na nawożenie służące zachowaniu lub zwiększeniu materii organicznej w glebach, w oparciu o stosowanie

preparatów mikrobiologicznych (4, 11, 31, 46). Preparaty te zalecane są szczególnie na gleby, na których nie stosuje się nawożenia obornikiem lub gnojowicą. Efekt działania takich preparatów nie jest jednoznaczny. Zgodnie z deklaracjami producentów, mają one w krótkim czasie zwiększać zawartość węgla organicznego w glebie oraz poprawiać właściwości gleby. Stosunkowo nowymi produktami, ale coraz popularniejszymi w Polsce, są preparaty mikrobiologiczne oparte na tzw. efektywnych mikroorganizmach, tzw. EM. Wielu badaczy (4, 31) opisuje korzystny wpływ i szerokie działanie mikroorganizmów na aktywność mikrobiologiczną gleby oraz poprawę jej właściwości chemicznych. Niektórzy (17) zwracają uwagę, że pozytywne działanie preparatu jest uzależnione od ilości jego stosowania oraz od rodzaju gleby. Z badań przeprowadzonych z pożytecznymi mikroorganizmami przez zespół naukowców (46) wynika, że po roku od zastosowania preparatu mikrobiologicznego EM nie stwierdza się znacznych zmian zawartości węgla organicznego w glebie. Na polu testowym, na którym nie stosowano nawożenia organicznego, po dwukrotnym zastosowaniu EM, zawartość węgla organicznego w glebie obniżyła się nawet o 19,1%. Wynika z tego, że przy polowym stosowaniu EM, konieczne jest obfite stosowanie nawożenia organicznego, w celu uniknięcia zmniejszenia zawartości węgla organicznego w glebie. Znaczne straty węgla organicznego z gleby, rzędu 5,8 tony, są najprawdopodobniej efektem metabolizmu efektywnych mikroorganizmów. W ramach badań prowadzono również obserwacje organoleptyczne i stwierdzono poprawę struktury gleby, gdyż w wierzchniej warstwie wytworzyły się charakterystyczne gruzelki. Jednak po ponownym zastosowaniu preparatu, w kolejnym okresie wegetacyjnym obserwowano pogorszenie właściwości gleby (46). Nie stwierdzono zmian ilościowych i jakościowych składu frakcyjnego próchnicy w glebie z pól nienawożonych i nawożonych EM. Przeprowadzone badania nie wykazały zatem pozytywnego wpływu tego preparatu mikrobiologicznego na zwiększenie zawartości węgla materii organicznej w glebie. Stosowanie efektywnych mikroorganizmów powinno być połączone ze stosowaniem nawozów organicznych i siewem poplonów, w celu przeciwdziałania zmniejszeniu zawartości materii organicznej w glebie. Preparat ten budzi wiele kontrowersji, głównie ze względu na zakładane szerokie spektrum działania (22, 32).

Podsumowanie

O właściwościach materii organicznej w glebie decyduje specyficzna struktura substancji humusowych: kwasów huminowych, kwasów fulwowych i humin (9, 12, 45). Zmiany zawartości materii organicznej i jej komponentów w glebach nie należy łączyć jedynie z rodzajem uprawianych roślin, gdyż współuczestniczą tu również zmiany sezonowe, uzależnione od wahań i nasilenia procesu mineralizacji. Źródłem materii organicznej w glebach, oprócz resztek pozbiorowych roślin, korzeni oraz tradycyjnych nawozów naturalnych i organicznych, mogą być nawozy organiczno-

-mineralne z węgla brunatnego. Dlatego też w ostatnich latach zwraca się uwagę na możliwości wykorzystania odpadowego węgla brunatnego, jako źródła materii organicznej (17, 25, 29, 30), zarówno w postaci mialu, jak i nawozów organiczno-mineralnych, i preparatów produkowanych na jego bazie (26, 28, 29) do nawożenia gleb lżejszych. Węgiel brunatny i nawozy produkowane z jego udziałem są lepszym od obornika źródłem materii organicznej w glebie.

Obecnie na rynku można znaleźć dużą gamę preparatów wytwarzanych na bazie leonardytów zawierających substancje humusowe. Producenci preparatów zawierających w składzie substancje humusowe gwarantują rolnikom osiąganie wysokich plonów roślin i szybką poprawę właściwości gleby, głównie poprzez wzrost zawartości próchnicy w glebie bez konieczności stosowania nawozów naturalnych. Prowadzone w IUNG-PIB badania rolnicze skuteczności działania preparatów humusowych na plony roślin uprawnych i żyzność gleby potwierdzają jedynie skuteczność tych preparatów na glebach o uregulowanym odczynie, na których stosuje się optymalne nawożenie NPK. W zależności od składu preparatu, może okresowo poprawiać się zasobność gleby w ten składnik pokarmowy, który występuje w większym stężeniu w preparacie. Ponieważ działanie tych preparatów polega na stymulowaniu utrzymywania się wyższego stężenia składników pokarmowych w pobliżu strefy korzeniowej, w efekcie rośliny mogą efektywniej wykorzystać składniki pokarmowe, co skutkuje wyższymi plonami. W przyszłości należy spodziewać się wzrostu stosowania w nawożeniu preparatów i środków poprawiających właściwości gleby z dodatkiem substancji humusowych oraz mikroorganizmów, w celu stabilizacji materii organicznej w glebie.

Literatura

1. Adamus M., Drozd J., Stanisławska E.: Współdziałanie nawozów organicznych i mineralnych w kształtowaniu przemian materii organicznej i właściwości fizykochemicznych gleb lekkich. [W:] Nawozy organiczne, AR Szczecin, 1998, 1: 118.
2. Bijlsma R.J., Lambers H.: A dynamic whole-plant model of integrated metabolism of nitrogen and carbon. *Plant and Soil*, 2000, 220: 71-87.
3. Błaszczak W.H.: Różnicowanie składu humusu agregatów glebowych, *Zesz. Probl. Post. Nauk Rol.*, 1993, 411: 69-76.
4. Boligłowa E.: Ochrona ziemniaka przed chorobami i szkodnikami przy użyciu Efektywnych Mikroorganizmów (EM) z udziałem ziół. [W:] Wybrane zagadnienia ekologiczne we współczesnym rolnictwie, pod red. Z. Zbytek. PIMR, Poznań, 2005, 165-170.
5. Cwojdzinski W., Nowak K.: Wybrane właściwości gleby w prowadzonym od 28 lat statycznym doświadczeniu nawozowym. *Zesz. Probl. Post. Nauk Rol.*, 2002, 484: 87-94.
6. Czyż E., Dexter A.R., Gadjia A.: Wpływ uproszczonej uprawy roli na właściwości fizyczne i mikrobiologiczne wybranych gleb, 2002, *Zesz. Nauk. Połud.-Wschod. Oddz. PTiE i PTG, Rzeszów*, 13: 33-35.

7. Dębicka B.: Właściwości substancji humusowych gleby nawożonej gnojowicą. Rozprawy 110, ATR Bydgoszcz, 2004.
8. Dziadowiec H.: Ekologiczna rola próchnicy glebowej. Zesz. Probl. Post. Nauk Rol., 1993, **411**: 270-272.
9. Dziadowiec H., Gonet S.S.: Przewodnik metodyczny do badań materii organicznej gleb. Prace. Kom. Nauk. PTG, Warszawa, 1999, 120, ss. 65.
10. Dziamski A.: Wpływ nawożenia organicznego na zawartość i jakość próchnicy gleb. Substancje humusowe w glebach i nawozach. PTSH, Wrocław, 2003.
11. Gałązka A., Kocoń A.: Wpływ preparatów z mikroorganizmami pożytecznymi na liczebność i biomasę mikroorganizmów glebowych. Studia i Raporty IUNG-PIB, 2015, **45(19)**: 127-142.
12. Gleboznawstwo, pod red. B. Dobrzańskiego, S. Zawadzkiego, PWRiL, Warszawa, 1999.
13. Gonet S.S.: Stan humusu w glebach w wieloletnich statycznych doświadczeniach nawozowych. Zesz. Nauk. AR Kraków, 1993, **277(37)**: 39-49.
14. Gonet S., Dębicka B.: Charakterystyka kwasów huminowych powstałych w procesie rozkładu resztek roślinnych. Zesz. Probl. Post. Nauk Roln., 1993, **411**: 241-248.
15. Gonet S.S., Wegner K.: Wpływ nawożenia na próchnicę gleb. Zesz. Nauk. AR we Wrocławiu, 1990, **196**: 127-135.
16. Janssen B.H., Noij G.A.M.: Simple model for calculation of nitrogen and phosphorus mineralization for „young” soil organic matter. DRAFT, AGN, 1986, 108.
17. Kaczmarek Z., Jakubus M., Grzelak M., Mrugańska M.: Impact of the addition of various doses of Effective Microorganisms to arable – humus horizons of mineral soils on their physical and water properties. J. Res. Appl. Agric. Eng., 2008, **53(3)**: 118-121.
18. Kalembasa S., Tengler S.: Rola węgla brunatnego w nawożeniu i ochronie środowiska. Monografie. Wyd. AP, Siedlce, 2004, 52, ss. 136.
19. Klimanek E.M., Klimanek E.M.: Umsetzungsverhalten von Emterückständen. Arch. Acker-Pflanzenbau, Bodenk. Berlin, 1990a, **34(8)**: 559-567.
20. Kobus J.: Biologiczne procesy a kształtowanie żyzności gleb. Zesz. Probl. Post. Nauk Roln., 1995, **421a**: 209-219.
21. Kondratowicz-Maciejewska K.: Wpływ nawożenia obornikiem i zmianowania na właściwości materii organicznej gleby. Rozpr. hab., Bydgoszcz, 2004, ss. 113.
22. Kosicka D., Wolna-Marucka A., Trzeciak M.: Wpływ preparatów mikrobiologicznych na glebę oraz wzrost i rozwój roślin. Kosmos. Problemy Nauk Biologicznych, 2015, t. 64, **2(307)**: 327-335.
23. Körschens M.: Importance of soil organic matter (SOM) for biomass production and environment (a review). Arch. Acker Pfl. Boden., 2002, **48**: 89-94.
24. Kuśńska A.: Właściwości związków próchnicznych bielicy próchnicznej z południowego pasma wydm Puszczy Kampinowskiej. [W:] Wpływ działalności człowieka na środowisko glebowe KPN. Wyd. SGGW-AR, Warszawa, 1996, 123-135.
25. Kwiatkowska J., Maciejewska A.: Wpływ rodzajów substancji organicznej na właściwości fizykochemiczne gleby i zawartość węgla organicznego. Rocz. Gleb., 2008, Tom LIX, **1**: 128-133.

26. Linaczar M., Drozd J., Weber J.: Wpływ Humidolu na niektóre właściwości fizykochemiczne gleb piaszczystych. Zesz. Probl. Post. Nauk Roln., 1996, **437**: 265-270.
27. Łoginow W., Andrzejewski J., Janowiak J.: Rola nawożenia organicznego w utrzymaniu zasobów materii organicznej w glebie. Roczn. Gleb., 1991, Tom XLII, **3/4**: 19-25.
28. Maciejewska A.: Badanie właściwości i żyzności gleby piaszczystej po zastosowaniu niekonwencjonalnego nawozu otrzymanego z węgla brunatnego. Rozpr. hab. Acta. Acad. Agricultur. Rech. Olst. Agricultura, 1994, **56**, Suppl. D: 4-9.
29. Maciejewska A., Kwiatkowska A.: Kształtowanie się właściwości fizykochemicznych gleby użyźnionej Rekulterem. Roczn. Gleb., 2004, Tom LV, **3**: 147-153.
30. Maciejewska A., Kwiatkowska J.: Niektóre właściwości chemiczne gleby oraz jej zdolności buforowe po zastosowaniu nawozu organiczno-mineralnego z węgla brunatnego. Zesz. Probl. Post. Nauk Roln., 2002, **482**: 351-357.
31. Majchrzak B., Waleryś Z., Okorski A.: Wykorzystanie efektywnych mikroorganizmów (EM) w biologicznej ochronie pszenżyta przed chorobami podsuszkowymi. XLV Sesja Naukowa Instytutu Ochrony Roślin. Poznań, 2005, 155-156.
32. Martyniuk S.: Czy rolnictwo konwencjonalne (intensywne) szkodzi mikroorganizmom glebowym? Polish J. Agron., 2014, **17**: 25-29.
33. Martyniuk S., Pikula D., Kozieł M.: Pozytywne i negatywne efekty dużego dopływu materii organicznej do gleby. Materiały Warsztatów Naukowych – „Instrumenty i metody przeciwdziałania degradacji gleb użytkowanych rolniczo”. IUNG-PTG, Puławy, 8-9.10.2015 r., 18-19.
34. Mazur T., Wojtas T., Mazur Z.: Rolnicza wartość nawozów organiczno-mineralnych produkowanych na bazie węgla brunatnego. Zesz. Probl. Post. Nauk Roln., 1998, **455**: 141-147.
35. Mercik S., Stępień W.: Działanie nawozów organicznych na glebie nienawożonej obornikiem przez 70 lat. Zesz. Nauk. AR Szczecin, 172, Rolnictwo, 1996, **62**: 357-365.
36. Orłowski D.S.: Praktikum po chemii gumusa. IMU, Moskawa, 1981.
37. Pikula D.: Aktualne trendy w gospodarowaniu glebową materią organiczną. Studia i Raporty IUNG-PIB, Puławy, 2013, **34(8)**: 109-124.
38. Pikula D., Rutkowska A.: Effect of leguminous crop and fertilization on soil organic carbon in 30-years field experiment. Plant Soil Environ., 2014, **60(11)**: 507-511.
39. Pranagal J.: Wpływ systemu uprawy na zawartość węgla organicznego w glebie. Annales UMCS, Sec. E, 2004, **59(1)**: 1-10.
40. Puła J., Łabza T.: Wpływ nawożenia organicznego na zawartość i skład frakcyjny związków próchnicznych gleby lekkiej. Annales UMCS, Sec. E., 2004, **59(4)**: 1513-1519.
41. Rutkowska A., Pikula D.: Effect of crop rotation and nitrogen fertilization on the quality and quantity of soil organic matter. Soil Science, Edited by: Dr. Maria C. Hernandez Soriano, InTech. Rozdział w monografii, 2012, 249-265.
42. Skłodowski P., Maciejewska A.: Właściwości materii organicznej gleb po agromelioracji nawozem organiczno-mineralnym. Komplet R. Zesz. Probl. Post. Nauk Rol., 1993, **409**: 203-208.
43. Spigarelli S.A.: Stimulation of anion root growth by peat humic substances. Effects of extraction, temperature and pH. 6th Int. Meeting IHSS, Monopoli (Bari), Abstracts, Italy, 1992, 79.

44. Sychaj-Fabisiak E., Smoliński S., Murawska B., Janowiak J.: The effect of differentiated nitrogen fertilization on the total carbon and nitrogen content on the rate of microflora development in soil. *Humic Subs. Ecosyst.*, 2003a, **5**: 109-117.
 45. Stevenson F.J.: *Humus Chemistry*. Wiley, Chichester, 1994.
 46. Tołoczko W., Trawczyńska A., Niewiadomski A.: Zawartość związków próchnicznych w glebach nawożonych preparatem EM. *Rocz. Gleb.*, Tom LX, **1**, Warszawa, 2009, 97-101.
 47. Wiater J.: Wpływ nawożenia organiczno-mineralnego na bilans węgla organicznego. *Fol. Univ. Agric. Stetin., Agricultura*, 2000, **84**: 515-520.
 48. Wiśniewski W., Wegner K., Gonet S.S.: Wpływ mineralnego i organicznego nawożenia na jakość próchnicy. *Rocz. Gleb.*, 1986, **37(2/3)**: 287-294.
 49. <http://rosahumus.pl/wyniki-badan/> (Data dostępu: 16.05.2016 r.)
-

Adres do korespondencji:

dr inż. Dorota Piśkuła
Zakład Żywienia Roślin i Nawożenia
IUNG-PIB
ul. Czartoryskich 8
24-100 Puławy
tel. 81 47 86 837
e-mail: dpikula@iung.pulawy.pl

Kazimierz Kęsik

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

ZASTOSOWANIE METODY MEHLICH 3 W SYSTEMIE DORADZTWA NAWOZOWEGO*

Słowa kluczowe: testy glebowe, test Mehlich 3, system doradztwa nawozowego

Wstęp

Oficjalnie przyjęty w Polsce system doradztwa nawozowego opiera się na bilansowaniu składników pokarmowych P, K i Mg. To oznacza, że ilość składników wnoszonych w nawozach równoważy potrzeby nawożenia, które są wyznaczone jako pobranie z plonami skorygowane stosownie do zasobności gleby w te składniki (17, 21). W związku z tym bardzo ważna jest, obok prawidłowego oszacowania przyszłego plonu rośliny uprawnej, poprawna ocena zasobności gleby. Aktualnie stosowane w Polsce metody (Egnera-Riehma dla P i K oraz Schachtschabela dla Mg) zostały zaadoptowane z niemieckiego doradztwa nawozowego w okresie powojennym i wprowadzone do praktyki rolniczej wraz z gotowymi liczbami granicznymi ustalonymi dla trzech klas zasobności. W latach 70. rozszerzono zakres liczb granicznych i opracowano dla tych metod Polskie Normy (18, 19, 20). Od tego czasu obowiązuje w polskim doradztwie nawozowym pięć klas zasobności w fosfor, potas i magnez: bardzo niska, niska, średnia, wysoka i bardzo wysoka (tab. 2). Dawki fosforu, potasu i magnezu różnicowane są w zależności od klasy zasobności. Początkowo (lata 70. ubiegłego wieku) przyjmowano zasadę, że dawki składników stosowane łącznie w nawozach mineralnych i naturalnych (szczególnie fosforu i potasu) powinny być wyższe od ilości pobieranych z plonami dla klas zasobności: niskiej i średniej (2, 3, 4). Zrównoważony bilans składników był przewidziany dopiero na poziomie zasobności wysokiej. System doradztwa nawozowego przewidywał wówczas maksymalizację plonu oraz stopniową poprawę zasobności gleb, szczególnie w przypadku gleb o bardzo niskiej i niskiej zawartości składników. W końcu XX i na początku XXI wieku tendencje rynkowe oraz trendy prośrodowiskowe w rolnictwie spowodowały istotną

* Opracowanie wykonano w ramach zadania 2.2 w programie wieloletnim IUNG-PIB.

zmianę w podejściu do gospodarki nawozowej w Polsce. Jako obowiązujące uznano tendencje ogólnościowe dotyczące rolnictwa zrównoważonego. Sprowadzały się one do wymogu nawożenia zgodnie z bilansem składników pokarmowych. Dążenie do zwiększania zasobności gleby stało się zadaniem drugorzędnym, a średnia zawartość składników w glebie została uznana za optymalną ze względów środowiskowych i produkcyjnych (7, 8, 9, 10). Założenia te zostały ujęte w oficjalnie przyjętym systemie doradztwa nawozowego Naw-Sald (7, 8, 9, 22) w formie odpowiedniego algorytmu, a także w postaci zaleceń tabelarycznych (10). Zasadę oszczędnego gospodarowania składnikami pokarmowymi przyjmuje się szczególnie rygorystycznie w stosunku do fosforu pochodzącego z nawozów naturalnych, jak i mineralnych. Fosfor, obok azotu, stanowi bowiem główną przyczynę zjawiska eutrofizacji wód otwartych, gdy poziom jego zawartości przekroczy dopuszczalne normy. Problem fosforu wymaga szczególnej uwagi, ponieważ nie wszyscy rolnicy, jak wskazują na to badania ankietowe, uwzględniają w systemie nawożenia ilość składnika pochodzącego z nawozów naturalnych (13). W związku z tym, szczególnie ważne jest monitorowanie zawartości tego składnika na polach produkcyjnych, gdzie stosuje się nawozy naturalne.

W latach 2005-2008 dokonano porównania systemu doradztwa nawozowego stosowanego w Polsce z analogicznymi systemami stosowanymi w państwach grupy MOEL. Program NawSald został uznany za co najmniej równorzędny z innymi poddanymi analizie, oficjalnymi systemami zaleceń nawozowych stosowanymi w jedenastu krajach regionu Europy Środkowo-Wschodniej (5). Zwrócono jednak wówczas uwagę na potrzebę stosowania w krajach regionu porównywalnych metod analityki glebowej. Dotychczas stosowane metody, szczególnie metoda Egnera-Riehma nastręcza wielu trudności analitycznych z racji specyfiki stosowanych odczynników. Wykorzystywany w tej procedurze mleczan wapnia łatwo podlega rozkładowi mikrobiologicznemu, poza tym jest to odczynnik wytwarzany w Polsce praktycznie tylko na potrzeby służby agrochemicznej i z powodu małej skali produkcji jej koszty są wysokie.

Celowość wprowadzenia metody Mehlich 3 do systemu doradztwa nawozowego

W ostatnich latach obserwuje się zwiększone zapotrzebowanie na analizy glebowe wynikające z licznych kontroli stanu agrochemicznego pól produkcyjnych w gospodarstwach związanych z realizacją różnych elementów WPR, a także z dążenia rolników do racjonalizacji gospodarki nawozowej w celu ograniczenia kosztów nawożenia. Zachętą do szerszego korzystania z oferty laboratoriów agrochemicznych wydaje się obniżenie kosztów usług analitycznych. W 2014 r. wdrożono w laboratoriach okręgowych stacji chemiczno-rolniczych nową metodę (Mehlich 3) oznaczania zawartości przyswajalnych form składników pokarmowych (P, K, Mg) w glebie. Ekstrakcja składników z gleby odbywa się z wykorzystaniem roztworu buforowego o pH 2,5, składającego się z pięciu składników: 0,2M CH_3COOH , 0,25M NH_4NO_3 ,

0,015M NH_4F , 0,013M HNO_3 , 0,001M EDTA (16). Metoda ta umożliwia równoczesną ekstrakcję wielu składników pokarmowych z gleby przy pomocy jednego roztworu z zachowaniem jednolitych warunków. Pozwala to na znaczne uproszczenie procedury analitycznej i obniżenie jej kosztów. Równocześnie następuje znaczące przyspieszenie oznaczania zawartości składników pokarmowych. Walory wdrożonej metody na tle dotychczas stosowanych przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1

Ocena postępowania analitycznego dla porównywanych testów

Potrzebne środki i procedury	Egner-Riehm DL		Schachtschabel	Mehlich 3
Zakres analityczny	P	K	Mg	P, K, Mg, Ca (S i mikroelementy)
Liczba sacek	1		1	1
Roztwór ekstrakcyjny (ml)	150		50	25
Ilość gleby (g)	3		5	2,5
Czas ekstrakcji (min)	90		1440*	5
Koszt odczynników (%)	100			80
Koszt pracy (%)	100			60
Zużycie wody (%)	100			17
Zużycie energii (%)	100			5
Sposób oznaczania P	kolorymetria	x	x	kolorymetria, ICP
Sposób oznaczania K	x	fotometria płomieniowa	x	fotometria płomieniowa, ICP
Sposób oznaczania Mg	x	x	ASA	ASA, ICP

* metoda statyczna;

Źródło: Lipiński, 2015 (6)

Zawartości składników oznaczone omawianymi metodami są traktowane jako formy ruchome, potencjalnie dostępne dla roślin. Aby metoda mogła być zastosowana do celów doradztwa nawozowego konieczne jest przeprowadzenie jej kalibracji (wyznaczenie liczb granicznych) w warunkach doświadczeń polowych. Zazwyczaj wymaga to wieloletnich badań z różnymi gatunkami roślin, prowadzonych w zróżnicowanych warunkach glebowych. Jak już zasygnalizowano we wprowadzeniu, liczby graniczne obowiązujące w Polsce dla aktualnie stosowanych metod zostały przyjęte w oparciu o badania niemieckie, przy czym ich prawidłowość została potwierdzona na podstawie serii wieloletnich badań polowych. Obecnie powtórzenie takich badań dla metody Mehlich 3 nie wydaje się być uzasadnione ekonomicznie. Na podstawie badań rozpoznawczych wykonanych w IUNG-PIB, metodami statystycznymi porównano

wyniki oznaczeń uzyskanych za pomocą znanych metod: Egnera-Riehma i Schtschabela z wynikami oznaczeń uzyskanych metodą Mehlich 3 wykonanych dla tego samego zbioru 700 próbek glebowych. Stwierdzono, że wysokie wartości współczynników korelacji pozwolą na przeliczenie znanych liczb granicznych dla wymienionych wyżej metod na wartości ustalone wg metody Mehlich 3 metodami analizy regresji (12). W dalszych wspólnych badaniach IUNG-PIB i OSChR wyznaczono równania regresji dla wyników oznaczeń dla blisko 5000 próbek glebowych pobranych w całym kraju. Stwierdzono silny związek pomiędzy wynikami uzyskanymi przy pomocy aktualnie stosowanych metod i nową metodą, pozwalający na dokonywanie wzmiankowanych przeliczeń (6, 14, 15).

Tabela 2

Współczynniki równań regresji wielomianowej i determinacji dla porównywanych metod w obrębie wydzielonych klas odczynu i kategorii agronomicznych gleb

Składnik	Wydzielone klasy i kategorie gleb	Równania regresji i zmienne	R ² (%)	p
Fosfor	klasy odczynu gleb (pH)	X – mg P ₂ O ₅ /100 g gleby (wg Egnera-Riehma) Y – mg P /100 g gleby (wg Mehlich 3)		
	<4,5	lnY = 1,195 lnX - 0,316	82,47	<0,001
	4,5-5,5	lnY = 1,064 lnX - 0,119	71,56	<0,001
	5,5-6,5	lnY = 0,959 lnX - 0,158	61,54	<0,001
	>6,5	lnY = 0,945 lnX - 0,538	65,40	<0,001
Potas	kategorie agronomiczne gleb	X – mg K ₂ O /100 g gleby (wg Egnera-Riehma) Y – mg K /100 g gleby (wg Mehlich 3)		
	b. lekkie	Y = 0,870X + 1,019	80,7	<0,001
	lekkie	Y = 0,924X + 0,624	84,1	<0,001
	średnie	Y = 0,815X + 3,735	74,0	<0,001
	ciężkie	Y = 0,963X + 2,943	84,1	<0,001
Magnez	kategorie agronomiczne gleb	X – mg Mg /100 g gleby (wg Schachtschabela) Y – mg Mg /100 g gleby (wg Mehlich 3)		
	b. lekkie	Y = 1,460X - 0,783	70,0	<0,001
	lekkie	Y = 1,093X + 0,0207X ² - 0,000491X ³ + 0,818	67,1	<0,001
	średnie	Y = 1,454X + 0,421	65,1	<0,001
	ciężkie	Y = 1,227 + 1,949	71,5	<0,001

Źródło: Kęsik i in., 2011 (14)

W odniesieniu do fosforu współczynniki determinacji R^2 przekraczały 60%, dla magnezu i potasu były wyższe odpowiednio od 65% i 70%. Wyliczone na podstawie równań regresji (tab. 2) wartości liczb granicznych pozwalają na wycenę klas zasobności gleby i stwarzają tym samym możliwość wykorzystania ich do ustalania dawek fosforu, potasu i magnezu pod rośliny uprawne w odniesieniu do gleb mineralnych w Polsce.

Techniczne uwarunkowania zastosowania metody Mehlich 3 w systemie doradztwa nawozowego

W aktualnie obowiązującym w Polsce systemie zaleceń nawozowych (Naw-Sald i inne) wykorzystuje się przyjęte do powszechnego stosowania tabele liczb granicznych (tab. 3) z wyznaczonymi klasami zasobności gleby.

Tabela 3

Obowiązujące liczby graniczne przyswajalnych form fosforu, potasu i magnezu

Kategoria agronomiczna gleby	Klasy zasobności gleb				
	bardzo niska	niska	średnia	wysoka	bardzo wysoka
Zawartość fosforu przyswajalnego wg Egnera-Riehma DL – P_2O_5 mg·100g ⁻¹ gleby					
Wszystkie kategorie	<5,0	5,1-10,0	10,1-15,0	15,1-20,0	>20,0
Zawartość potasu przyswajalnego wg Egnera-Riehma DL – K_2O mg·100g ⁻¹ gleby					
bardzo lekka	<2,5	2,6-7,5	7,6-12,5	12,6-17,5	>17,5
lekka	<5,0	5,1-10,0	10,1-15,0	15,1-20,0	>20
średnia	<7,5	7,6-12,5	12,6-20,0	20,1-25,0	>25
ciężka	<10,0	10,1-15,0	15,1-25,0	25,1-30,0	>30
Zawartość magnezu przyswajalnego wg Schachtschabela – Mg mg·100g ⁻¹ gleby					
bardzo lekka	<1,0	1,1-2,0	2,1-4,0	4,1-6,0	>6,0
lekka	<2,0	2,1-3,0	3,1-5,0	5,1-7,0	>7,0
średnia	<3,0	3,1-5,0	5,1-7,0	7,1-9,0	>9,0
ciężka	<4,0	4,1-6,0	6,1-10,0	10,0-14,0	>14

Źródło: opracowano na podstawie Zaleceń Nawozowych (21)

Stosuje się je do wyceny zasobności gleby po wykonaniu analizy chemicznej w pobranej próbce gleby. W odniesieniu do potasu i magnezu przy wycenie zasobności gleby uwzględnia się dodatkowo podział gleb na kategorie agronomiczne (tab. 4).

Tabela 4

Obowiązujące kategorie agronomiczne gleb (wg PTG)

Kategoria agronomiczna	Grupa granulometryczna – skrót	% frakcji <0,02 mm
bardzo lekkie	piasek luźny – pl piasek luźny pylasty – plp piasek słabo gliniasty – ps piasek słabo gliniasty pylasty – psp	0-10
lekkie	piasek gliniasty lekki – pgl piasek gliniasty lekki pylasty – pglp piasek gliniasty mocny – pgm piasek gliniasty mocny pylasty – pgmp pył piaszczysty – plp pył zwykły – plz	10-20
średnie	glina lekka – gl glina lekka pylasta – glp pył gliniasty – plg	21-35
ciężkie	glina średnia – gs glina średnia pylasta – gsp glina ciężka – gc glina ciężka pylasta – gcp pył ilasty – pli ił – i ił pylasty – ip	>35

Źródło: Zalecenia nawozowe (21)

W tym celu obok oznaczenia zasobności w składniki pokarmowe niezbędna jest także analiza składu granulometrycznego tych gleb. Ocena zawartości przyswajalnych form fosforu oznaczonych metodą Egnera-Riehma jest jednakowa dla wszystkich gleb mineralnych i nie uwzględniania innych parametrów glebowych (tab. 3). Uzyskane wyniki badań gleby z OSChR są zawsze podane w formie klas zasobności (wycenę zasobności wykonuje wówczas stacja chemiczno-rolnicza), na życzenie klienta podawane są również wartości liczbowe wyników w mg P_2O_5 lub K_2O w 100 g gleby oraz w mg Mg w 100 g gleby. Wprowadzanie wyników do programu komputerowego doradztwa nawozowego jest alternatywne, można stosować zarówno dane liczbowe, jak i klasy zasobności. Program przyjmuje obie formy wyników. Zalecenia tabelaryczne przewidują wykorzystanie klas zasobności gleby tylko do skorygowania dawek składników pokarmowych.

Aktualnie zalecany program NawSald został w 2016 r. uzupełniony o dodatkową możliwość wyznaczania dawek fosforu, potasu i magnezu na podstawie wyników analizy gleby wykonanych metodą Mehlich 3. W programie przewidziano dodatkową planszę pozwalającą na wprowadzanie wyników uzyskanych tą metodą.

Podawane przez OSChR wyniki analiz są przedstawiane w mg P, K i Mg w 1 kg gleby lub w klasach zasobności. Zasady wykorzystania liczb granicznych potasu i magnezu wyznaczonych metodą Mehlich 3 (tab. 5) w programie doradczym są analogiczne do aktualnie stosowanych metod. Program uwzględnia kategorie agronomiczne gleby przy wycenie klasy zasobności tych składników.

Tabela 5

Liczby graniczne zawartości form przyswajalnych P, K, Mg
wyznaczone dla metody Mehlich 3

Odczyn/Kategoria agronomiczna gleby	Klasy zasobności gleb				
	bardzo niska	niska	średnia	wysoka	bardzo wysoka
Zawartość fosforu przyswajalnego – P mg·kg ⁻¹ gleby					
bardzo kwaśny (pH<4,5) ¹	<50	50-110	111-186	187-262	>262
kwaśny (pH 4,6-5,5)	<49	49-103	104-158	159-215	>215
lekko kwaśny (pH 5,6-6,5)	<47	47-99	100-152	153-207	>207
obojętny (pH 6,6-7,2)	<27	27-54	55-75	76-99	>99
zasadowy (pH>7,2)	<27	27-54	55-75	76-99	>99
Zawartość potasu przyswajalnego – K mg·kg ⁻¹ gleby					
bardzo lekka	<32	32-75	75-119	120-162	>162
lekka	<52	52-99	100-145	146-191	>191
średnia	<98	98-139	140-200	201-241	>241
ciężka	<126	126-174	175-270	270-318	>318
Zawartość magnezu przyswajalnego – Mg mg·kg ⁻¹ gleby					
bardzo lekka	<7	7-21	22-51	52-80	>80
lekka	<31	31-43	44-67	68-93	>93
średnia	<48	48-77	78-106	107-135	>135
ciężka	<69	70-93	94-142	143-191	>191

¹ w nawiasach przedstawiono przedziały pH w 1n KCl (21)

Źródło: Instrukcja wdrożeniowa (14)

W odniesieniu do fosforu wprowadzona została natomiast istotna zmiana, tzn. do oceny zasobności zastosowano dodatkowy parametr, tj. odczyn gleb (tab. 5). Liczby graniczne (klasy zasobności w fosfor), a także zalecane dawki fosforu zmieniają się w tym przypadku zależnie od zawartości P w glebie i od przedziału pH gleby w 1N KCl. W przypadku stosowania metody Egnera-Riehma klasy zasobności fosforu zależały jedynie od zawartości fosforu w glebie.

Inne zastosowania metody Mehlich 3

Autorzy amerykańscy cytowani przez Jurgę (11) wykorzystują oznaczenia fosforu wg metody Mehlich 3 do wstępnej oceny zagrożeń środowiskowych spowodowanych nadmiarem tego składnika w glebie przy pomocy tzw. „pensylwańskiego indeksu fosforowego” dla pól uprawnych i mikrozelewni. Przyjmują, że zawartości poniżej 200 mg P/kg gleby wg metody Mehlich 3 można uważać za bezpieczne środowiskowo. Zawartości wyższe są już nieuzasadnione z punktu widzenia środowiskowego, ponieważ zwiększają ryzyko strat tego składnika drogą zmywów powierzchniowych do wód. Na glebach o zawartości powyżej 200 mg P/kg gleby rzadko też obserwuje się przyrosty plonów roślin uprawnych pod wpływem dodatkowych porcji nawozów fosforowych, w związku z czym graniczną zawartość 200 mg P/kg gleby wg metody Mehlich 3 uznano za wygodny wskaźnik wstępnej oceny ryzyka związanego z nadmiarem fosforu w glebie. W Polsce zastosowanie tego wskaźnika do oceny skali zagrożeń stratami fosforanów do wód otwartych nie jest jeszcze możliwe z uwagi na mały zakres analiz wykonanych tą metodą. Nie jest natomiast znana z literatury analogiczna graniczna zawartość dla metody Egnera-Riehma. Dlatego celowym wydaje się tymczasowe przeliczenie wspomnianej granicznej wartości fosforu przyjętej dla metody Mehlich 3 na zawartości P wg metody Egnera-Riehma z zastosowaniem równań regresji wykorzystanych do obliczenia klas zasobności (tab. 2).

W odniesieniu do metody Mehlich 3, niezależnie od wzmiankowanej granicznej zawartości fosforu, możliwe jest wyznaczenie bardziej precyzyjnego wskaźnika oceniającego zagrożenia środowiskowe związane z nadmiernym nagromadzeniem tego składnika w glebie. Równoczesne oznaczenie w wyciągu Mehlich 3 obok fosforu także zawartości żelaza i glinu, pozwala bowiem na wyznaczenie wskaźnika „P-sorption saturation” charakteryzującego stan fosforowy gleby w zakresie jej wysycenia fosforem (1). Wskaźnik „P-sorption saturation w skrócie – P_{sat} ” określa stopień wypełnienia zdolności sorpcyjnych gleby przez fosfor wyrażony w procentach.

W skrajnych przypadkach, gdy gleba jest nasycona fosforem, wskaźnik ten może przyjmować wartości wyższe niż 100%. Wraz ze wzrostem wartości wskaźnika P_{sat} , zwiększa się ryzyko strat fosforu w wyniku przemieszczania się jego rozpuszczalnych form w głąb profilu gleby i do wód drenarskich. Przekroczenie poziomu 25% stopnia wysycenia gleb fosforem (niezależnie od kategorii agronomicznej i zakresu pH gleby) uznaje się w literaturze zachodniej za nieuzasadnione z punktu widzenia potrzeb nawożenia roślin, a także ze względu na rosnące ryzyko środowiskowe. Z dotychczasowych badań IUNG-PIB i OSChR (przebadano 8539 próbek gleby z obszaru całej Polski) w zakresie wskaźnika P_{sat} wynika, że jego przeciętna wartość dla warunków analizowanego zbioru próbek kształtuje się na poziomie 18,1% wysycenia gleb fosforem.

Z innych pozytywnych cech łącznego oznaczania zawartości składników pokarmowych w wyciągu Mehlich 3 należy uznać możliwość pomiaru koncentracji sumy

kationów rozumianych jako kationy wymienne, tzn.: wapnia, magnezu i potasu oraz możliwość ustalenia wzajemnych relacji tych składników (1). Oznaczenie K, Mg i Ca przeprowadzono w przytaczanym wyżej zbiorze próbek glebowych, a wyniki zostaną zestawione w niedalekiej przyszłości.

Podsumowanie

Wdrożenie metody Mehlich 3 w systemie doradztwa nawozowego nie przewiduje całkowitego zaprzestania stosowania dotychczas przyjętych metod badania gleby. Zwłaszcza w odniesieniu do badań monitoringowych prowadzonych wg tej samej metodyki przez wiele lat zastosowanie nowej metody nie wydaje się uzasadnione. Zastosowanie nowej metody w systemie doradztwa nawozowego należy traktować jako rozszerzenie oferty wykonywanych oznaczeń przez OSChR. Zastosowanie nowej metody analizy gleby nie powoduje jakichkolwiek problemów dla rolników. Natomiast uproszczenie procedury badawczej i zmniejszenie kosztów analitycznych może się przyczynić do szerszego korzystania rolników z usług laboratoriów agrochemicznych. Za stosowaniem nowej metody przemawia także możliwość uzyskania dodatkowych wskaźników agrochemicznych, szerzej charakteryzujących właściwości gleby. Może to wpłynąć także na poprawę oceny stanu agrochemicznego pola w ujęciu zmienności przestrzennej dzięki mniejszym kosztom analiz. Równie perspektywiczne wydaje się zastosowanie metody Mehlich 3 w odniesieniu do rolnictwa precyzyjnego, gdzie zapotrzebowanie na ilość wykonywanych oznaczeń jest znacząco większe w stosunku do rolnictwa klasycznego.

Literatura

1. Carter M.R., Gregorich E.G.: Soil Sampling and Methods of Analysis. (2nd ed.) Canadian Society of Soil Science. USA, Boca Raton, 2008.
2. Fotyma M., Kęsik K.: Optymalizacja nawożenia – zasady ustalania dawek fosforu. Nowe Rolnictwo, 1977, **6**: 8-10.
3. Fotyma M., Gosek S.: Optymalizacja nawożenia – Zasady ustalania dawek potasu. Nowe Rolnictwo, 1977, **7**: 21-25.
4. Fotyma M.: Wykorzystanie nowych liczb granicznych zawartości makroelementów w glebach. Nowe Rolnictwo, 1986, **6**: 1-4.
5. Fotyma M., Dobers S.: Soil testing methods and fertilizer recommendations in Central-Eastern European countries, Nawozy i Nawożenie – Fertilizers and Fertilization, 2008, **30**: 1-109.
6. Fotyma M., Kęsik K., Lipiński W., Filipiak K., Purchała L.: Testy glebowe jako podstawa doradztwa nawozowego. Studia i Raporty IUNG-PIB, Puławy, 2015, **42**: 9-25.
7. Jadczyzyn T.: Informatyka w doradztwie nawozowym. Nawozy i Nawożenie – Fertilizers and Fertilization, 2000, **4**: 49-60.
8. Jadczyzyn T.: Podstawy naukowe doradztwa nawozowego. Nawozy i Nawożenie – Fertilizers and Fertilization, 2000, **5**: 185-205.

9. Jadczyśzyn T.: Planowanie nawożenia w gospodarstwie z wykorzystaniem programu NawSald. Studia i Raporty IUNG-PIB, Puławy, 2009, **16**: 9-18.
 10. Jadczyśzyn T., Kowalczyk J., Lipiński W.: Zalecenia nawozowe dla roślin uprawy polowej i trwałych użytków zielonych. Mat. szkol., nr 95, IUNG-PIB, Puławy, 2010.
 11. Jurga B.: Indeks fosforowy jako narzędzie do szacowania ryzyka strat fosforu do wód. Studia i Raporty IUNG-PIB, Puławy, 2015, **42**: 91-112.
 12. Kęsik K., Jadczyśzyn T., Kocoń A., Janda B., Boreczek B., Pikuła D., Tujaka A., Podleśna A., Ochal P., Bochniarz A.: Wstępne wyniki badań nad wprowadzeniem w Polsce testu glebowego Mehlich 3. Nawozy i Nawożenie – Fertilizers and Fertilization, 2011, **45**: 129-150.
 13. Kęsik K., Krasowicz S., Zarychta M.: Dawki NPK stosowane w praktyce rolniczej pod zboża ozime na tle zaleceń nawozowych. Nawozy i Nawożenie – Fertilizers and Fertilization, 2011, **44**: 51-98.
 14. Kęsik K., Lipiński W., Jadczyśzyn T., Boreczek B., Janda B., Sumorek-Gołąbek A., Kocoń A., Ochal P., Pikuła D., Bochniarz A.: Liczby graniczne oraz procedura badawcza oznaczania metodą Mehlich 3 ruchomych form fosforu, potasu i magnezu w glebach mineralnych. Instrukcja wdrożeniowa, nr 230, IUNG-PIB, Puławy, 2014.
 15. Kęsik K., Jadczyśzyn T., Lipiński W., Jurga B.: Adaptacja testu Mehlicha 3 do rutynowych oznaczeń zawartości fosforu, potasu i magnezu w glebie. Przemysł Chemiczny, 2015, **94/6**: 973-976.
 16. Mehlich A.: Mehlich 3 soil extractant: A modification of Mehlich 2 extractant. Commun. in Soil Science and Plant Analysis, 1984, **15**: 1409-1416.
 17. Oferta IUNG-PIB (programy komputerowe). http://www.iung.pulawy.pl/index.php?option=com_content&view=article&id=100&Itemid=95#programy
 18. PN-R-04022:1996/Az1:2002. Analiza chemiczno-rolnicza gleby. Oznaczanie zawartości przyswajalnego potasu w glebach mineralnych.
 19. PN-R-04023:1996. Analiza chemiczno-rolnicza gleby. Oznaczanie zawartości przyswajalnego fosforu w glebach mineralnych.
 20. PN-R-04020:1994/Az1: 2004. Analiza chemiczno-rolnicza gleby. Oznaczanie zawartości przyswajalnego magnezu.
 21. Zalecenia Nawozowe. Część I. Liczby graniczne dla wyceny zawartości w glebach makro- i mikroelementów. IUNG, Puławy, 1990, Seria P (44): 1-26.
 22. www.schr.gov.pl/p,160,doradztwo-nawozowe
-

Adres do korespondencji:

dr Kazimierz Kęsik
Zakład Żywienia Roślin i Nawożenia
IUNG-PIB
ul. Czartoryskich 8
24-100 Puławy
tel. 81 47 86 838
e-mail: kesik@iung.pulawy.pl

Alicja Pecio, Jacek Niedźwiecki, Guillaume Debaene

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

ROZPOZNANIE POŁA PODSTAWĄ PRECYZYJNEGO NAWOŻENIA ROŚLIN*

Słowa kluczowe: rolnictwo precyzyjne, warunki glebowe, pszenica ozima, plon ziarna, stan łanu, pomiary punktowe, metody on-the-go

Wstęp

W praktyce rolniczej krajów przodującego rolnictwa powszechna staje się koncepcja rolnictwa precyzyjnego polegająca na różnicowaniu zabiegów agrotechnicznych, zwłaszcza nawożenia, w obrębie jednego pola o zróżnicowanej pokrywie glebowej. Punktem wyjścia w takim systemie produkcji roślinnej jest rozpoznanie przestrzennej zmienności cech gleby i pokrywy roślinnej, w tym plonu końcowego oraz ich odwzorowanie w postaci map cyfrowych. Rozpoznanie zakresu zmienności pola i wyznaczenie obszarów o niesprzyjających warunkach dla plonowania roślin umożliwia wprowadzenie technik polegających na stosowaniu odpowiednio zróżnicowanych zabiegów agrotechnicznych.

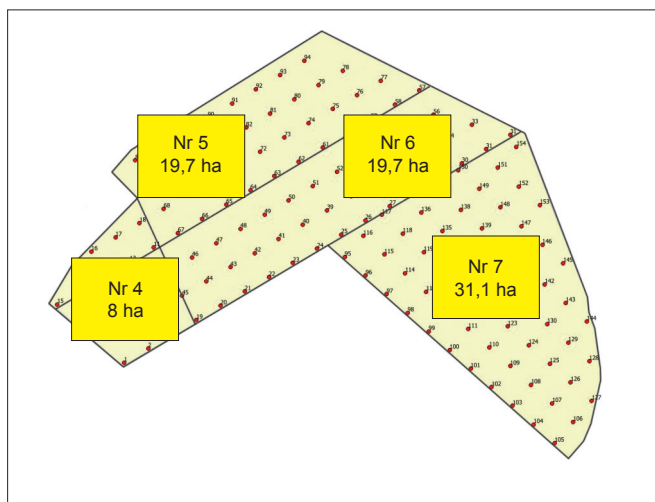
Rozpoznanie zmienności glebowej i zmienności łanu w obrębie pola można dokonać w sposób bezpośredni, poprzez pobieranie i analizowanie próbek gleby w siatce punktów pomiarowych lub w sposób pośredni, z zastosowaniem ciągłych pomiarów elektromagnetycznych lub spektralnych w zakresie światła widzialnego i bliskiej podczerwieni (VIS-NIR) (1, 2, 3, 6, 9, 12), czy też zdjęć lotniczych. Metodami tymi, z dużą rozdzielczością przestrzenną, można ocenić zmienność zarówno właściwości gleby, takich jak m.in. tekstura czy zawartość węgla organicznego, jak również właściwości łanu roślin, np. stan odżywienia azotem. Na podstawie szczegółowych informacji o zmienności właściwości fizycznych gleby, zasobności w składniki pokarmowe oraz stanie odżywienia roślin w oparciu o wskaźniki wegetacyjne można zoptymalizować nawożenie, stosując technologię VRA – *variable rate application*. Punktowe obserwacje bezpośrednie umożliwiają ponadto kalibrację ciągłych pomiarów pośrednich, które bez tej kalibracji nie mogą być wykorzystane w praktyce (10, 12).

* Opracowanie wykonano w ramach zadań 1.2 i 2.2 w programie wieloletnim IUNG-PIB.

Badania, których celem było wypracowanie metod oceny przestrzennej i czasowej zmienności właściwości gleby prowadzone są w Stacji Doświadczalnej w Baborówku od początku lat 90. ubiegłego wieku. Na podstawie wieloletnich badań scharakteryzowano zmienność glebową pola o powierzchni ok. 50 ha (7), opisano klasyczne i zaawansowane metody badania tej zmienności (11), a także wyznaczono odpowiednie dawki nawozów (8). Podobne badania, aczkolwiek z zastosowaniem nowych metod, przeprowadzono także na innym polu SD w Baborówku, o powierzchni 78,5 ha, które przejęto po ok. 15 latach uprawy bezorkowej. W pracy przedstawiono wyniki rozpoznania przestrzennego zróżnicowania właściwości gleby i łanu pszenicy ozimej, z zastosowaniem klasycznej metody badań w stałej sieci punktów pomiarowych oraz innowacyjnych metod „on-the-go”, które przeprowadzono w celu określenia przestrzennie zróżnicowanych dawek nawożenia pod pszenicę ozimą.

Metodyka badań

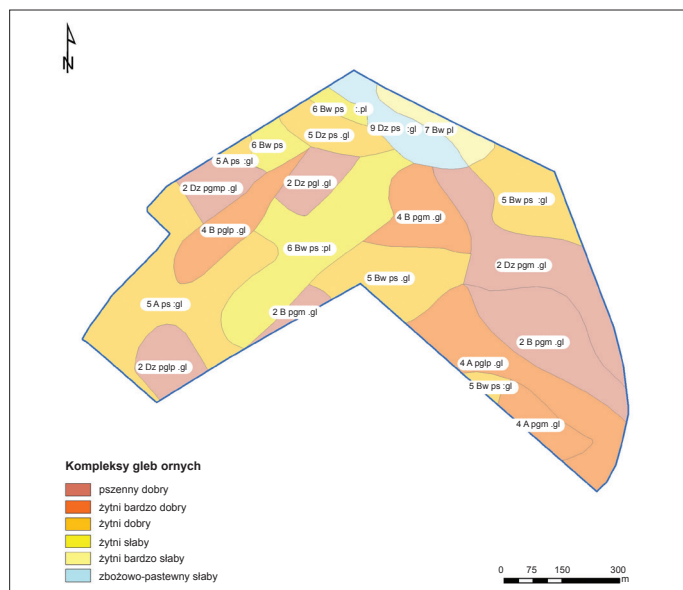
Badania prowadzono w SD IUNG-PIB w Baborówku (16°38'50 E, 52°34'50 N), w latach 2013-2015, na polu o łącznej powierzchni 78,5 ha. Obszar ten był podzielony na 3 pola płodozmienne o powierzchni: 19,7 ha, 19,7 ha i 31,1 ha, na których uprawiano kolejno rzepak ozimy, pszenicę ozimą i jęczmień jary (rys. 1). Wydzielono ponadto pole o pow. 8 ha pod uprawę kukurydzy. Wszystkie zabiegi agrotechniczne, łącznie z nawożeniem, stosowane były jednolicie na powierzchni pól, odpowiednio dla uprawianych roślin. Badania prowadzono dwoma sposobami: w siatce stałych punktów pomiarowych oraz metodą pomiarów ciągłych bezpośrednio w polu.



Rys. 1. Układ pól płodozmiennych

Wyniki badań

Podstawowego rozpoznania warunków glebowych dokonano z wykorzystaniem mapy glebowo-rolniczej, która wykazała bardzo duże zróżnicowanie w obrębie pola (rys. 2). Stwierdzono, że występują tu gleby płowe (A), brunatne (B), brunatne wyługowane (Bw) i czarne ziemie (Dz), należące do kompleksu pszennego dobrego (2), żytniego bardzo dobrego, żytniego dobrego i żytniego słabego (4, 5, 6), a także zbożowo-pastewnego słabego (9). Są to gleby o składzie granulometrycznym piasku gliniastego mocnego (pgm), piasku gliniastego mocnego pylastego (pgmp), piasku słabo gliniastego (ps), piasku gliniastego lekkiego (pgl) i piasku gliniastego lekkiego pylastego (pglp).



Rys. 2. Mapa glebowo-rolnicza

Źródło: opracowanie własne

Obserwacje i pomiary w punktach siatki geostatystycznej

Badania w punktach siatki geostatystycznej prowadzono metodą obserwacji naukowych. Zgodnie z tą metodą, na całym polu rozmieszczono 154 punkty pomiarowe, w których wykonywano szczegółowe obserwacje i pomiary właściwości gleby oraz łanu roślin i plonu pszenicy ozimej (rys. 1). Punkty te znajdowały się w wierzchołkach geostatystycznej siatki kwadratów o boku 72 m, a ich położenie dodatkowo opisano współrzędnymi geograficznymi.

Analizy gleby

We wszystkich punktach pomiarowych, jesienią 2014 roku, pobrano próbki gleby z warstwy 0-20 cm i określono jej właściwości agrochemiczne, tj. skład granulometryczny metodą laserową (Z-d Gleboznawstwa Erozji i Ochrony Gruntów IUNG-PIB), odczyn pH w 1 M KCl oraz zawartość podstawowych makroelementów (K_2O , P_2O_5 , Mg, C_{org}) dwoma metodami: dotychczas stosowanymi metodami chemicznymi w GLACH IUNG-PIB w Puławach oraz za pomocą spektrofotometru VIS-NIR w laboratorium Z-du Gleboznawstwa Erozji i Ochrony Gruntów IUNG-PIB.

Analiza chemiczna próbek gleby wykazała średnią wartość pH 5,6, co pozwoliło zaliczyć ją do gleb lekko kwaśnych, wysoką zawartość P_2O_5 , bardzo wysoką zawartość K_2O , wysoką zawartość Mg oraz niską, jak na warunki europejskie (wg European Soil Base) lub średnią – według klasyfikacji polskiej – zawartość próchnicy (tab. 1).

Analiza składu granulometrycznego metodą laserową wykazała ok. 10-procentową średnią zawartość części spławialnych. Oznacza to, że glebę całego pola należy zaliczyć do kategorii gleb bardzo lekkich, przy czym zmienność tego parametru była bardzo duża, gdyż współczynnik zmienności wynosił ok. 50% (tab. 1).

Tabela 1

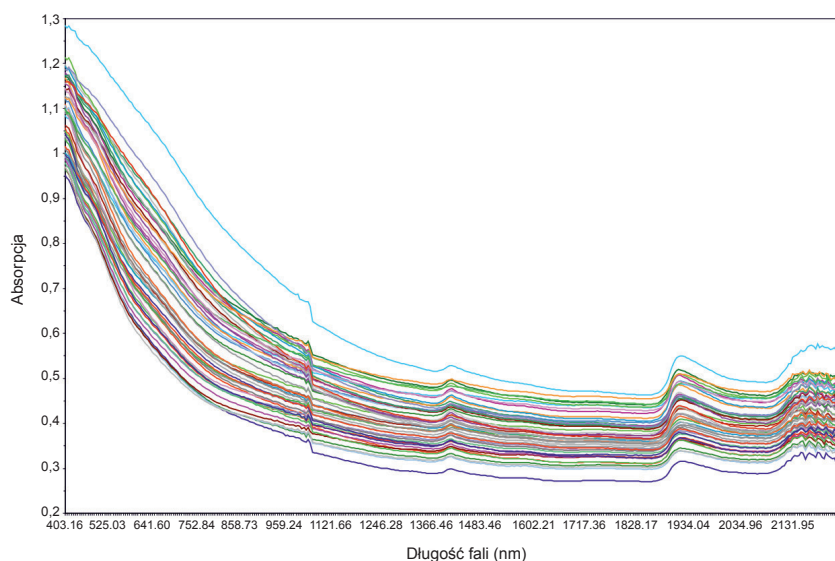
Właściwości fizykochemiczne gleb oznaczone metodami chemicznymi oraz skład granulometryczny określony metodą laserową w punktach pomiarowych

Charakterystyka statystyczna	Właściwości agrochemiczne					Fracje glebowe (mm)		
	pH	P ₂ O ₅	K ₂ O	Mg	C _{org}	piasek (2,0-0,1)	pył (0,1-0,02)	cz. spław (<0,02)
		mg 100 g ⁻¹ gleby			%			
Liczebność	154							
Średnia	5,6	16,0	22,7	6,07	1,10	69,3	20,9	9,7
Mediana	5,7	14,0	20,5	5,10	1,07	67,4	22,0	10,0
Odchylenie standardowe	0,89	9,71	9,17	3,82	0,28	10,8	6,13	4,9
Współczynnik zmienności	15,7	60,5	40,3	63,0	25,0	15,6	29,3	50,3
Minimum	3,6	4,3	6,0	0,4	0,6	45,3	8,3	1,7
Maksimum	7,6	67,3	46,9	19,9	2,09	90,0	35,1	22,7

Źródło: opracowanie własne

Spektrometria bliskiej podczerwieni VIS-NIRS korzysta z długości fal w przedziale od 350 do 2500 nm. Absorpcji promieniowania podczerwonego towarzyszą zmiany energii oscylacyjnej cząsteczek. Ponieważ energia ta jest skwantowana, absorbowane jest tylko promieniowanie o pewnych określonych energiach, charakterystycznych dla grup funkcyjnych wykonujących drgania (tj. O-H, C-H, N-H, S-H, C=O).

Ilość promieniowania, która jest absorbowana, określona jest przez właściwości i ilość wiązań obecnych w badanym materiale. Stąd widma w zakresie bliskiej podczerwieni zawierają szczegółowe informacje na temat składu chemicznego badanych substancji. Oprócz składu chemicznego materiału, na właściwości spektralne ma również wpływ fizyczna struktura materiału. Rozmiar i kształt cząstek oraz puste przestrzenie pomiędzy cząstkami wpływają na długość transmisji światła przechodzącego przez próbkę, jak również na współczynnik odbicia. Widma glebowe w zakresie bliskiej podczerwieni NIR zależą również od wilgotności badanego materiału (silna absorpcja przy 1450 nm i 1930 nm). Są one bardzo złożone i niezwykle trudne do jednoznacznej identyfikacji (rys. 3).



Rys. 3. Widma spektralne badanych gleb (154 próbki)

Źródło: opracowanie własne

Uzyskane widma wykorzystywano do szacowania właściwości fizykochemicznych gleb za pomocą uzyskanych modeli predykcyjnych. Wszystkie modele zbudowano klasyczną metodą z wykorzystaniem losowo wybranych 2/3, tj. 100, próbek do kalibracji i 1/3, tj. 54, próbek do walidacji. Zastosowano także metodę opisaną przez Debaene i in. (4) z wykorzystaniem 20%, tj. 31, próbek do kalibracji i 123 próbek do walidacji. Próbkę do kalibracji wybierano na podstawie algorytmu K-means analizy skupień opisanego w tej publikacji. Taka predykcja właściwości gleby z zastosowaniem technologii VIS-NIR umożliwia redukcję kosztów analiz laboratoryjnych o ok. 80%.

Wyniki analizy PLS wykazały, że najlepsze modele predykcyjne otrzymano dla zawartości węgla organicznego C_{org} i frakcji iłu koloidalnego (tab. 2). Dla pozostałych właściwości gleby uzyskano nieco mniejsze wartości predykcyjne modeli.

Tabela 2

Wyniki analizy modeli cząstkowych najmniejszych kwadratów (PLS)

Właściwości gleby	Na podstawie 100 próbek kalibracyjnych		Na podstawie 31 próbek kalibracyjnych	
	R ²	RMSEP	R ²	RMSEP
P ₂ O ₅	0,65	5,13	0,65	5,26
K ₂ O	0,70	1,83	0,69	1,87
Mg	0,71	0,45	0,70	0,47
C _{org}	0,74	0,08	0,72	0,08
H koloidalny	0,81	0,23	0,80	0,27
pH	0,66	0,78	0,62	0,80

Źródło: opracowanie własne

Charakterystykę statystyczną zmienności w obrębie pola tak oszacowanych właściwości fizykochemicznych gleb zestawiono w tabeli 3.

Tabela 3

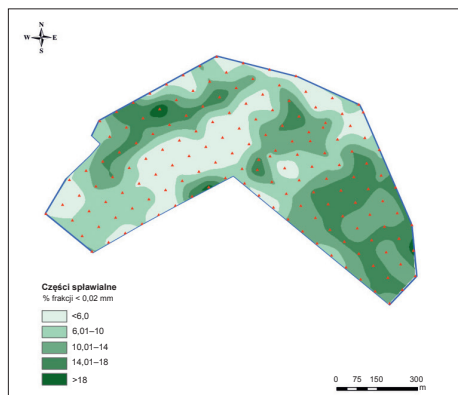
Właściwości fizykochemiczne gleb oraz skład granulometryczny oznaczane za pomocą spektrofotometru VIS-NIR w punktach pomiarowych

Miara statystyczna	Właściwości agrochemiczne					Fracje glebowe (mm)		
	pH	P ₂ O ₅	K ₂ O	Mg	C _{org}	piasek (2,0-0,1)	pył (0,1-0,02)	cz. splaw. (<0,02)
		mg 100 g ⁻¹ gleby			%			
Liczebność	154							
Średnia	5,7	15,8	22,9	6,01	1,07	1,07	67,6	19,8
Mediana	5,7	13,8	21,5	4,92	1,08	1,08	67,2	20,4
Odchylenie standardowe	1,1	10,2	9,51	4,10	0,42	0,42	12,2	6,74
Współczynnik zmienności	19,5	64,9	41,5	68,3	39,5	39,5	18,0	34,0
Minimum	3,3	1,80	1,90	1,20	0,03	0,03	39,7	6,68
Maksimum	8,2	73,1	51,9	20,6	2,28	2,28	94,3	35,4

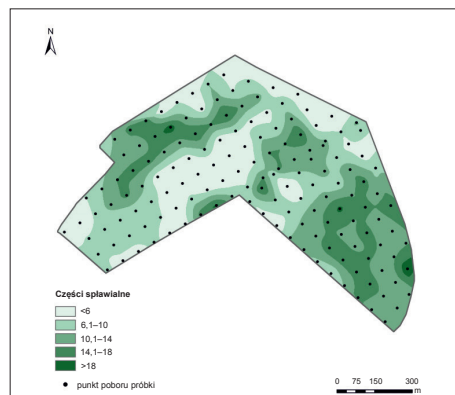
Źródło: opracowanie własne

Wyniki badań właściwości fizykochemicznych gleb uzyskane metodami chemicznymi oraz z zastosowaniem spektrofotometru VIS-NIR są w dużym stopniu zbieżne (por. tab. 1 i tab. 3). Na kolejnych stronach przedstawiono porównanie map właściwości gleb oznaczonych metodami: chemicznymi i metodą laserową (zawartość części splawialnych) oraz za pomocą spektrofotometru VIS-NIR (rys. 4).

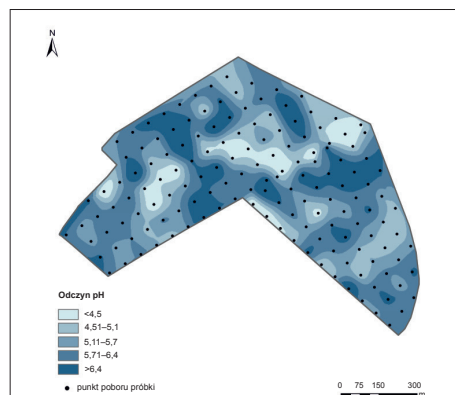
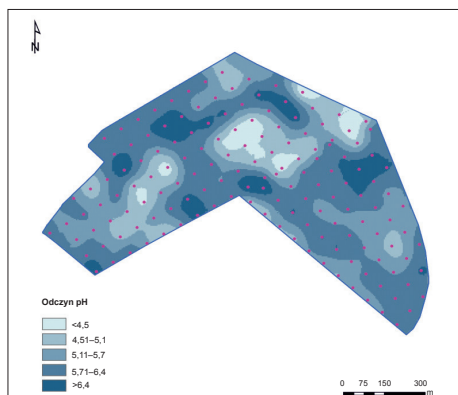
Metody tradycyjne



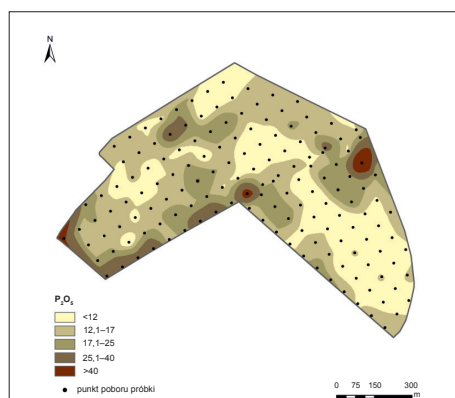
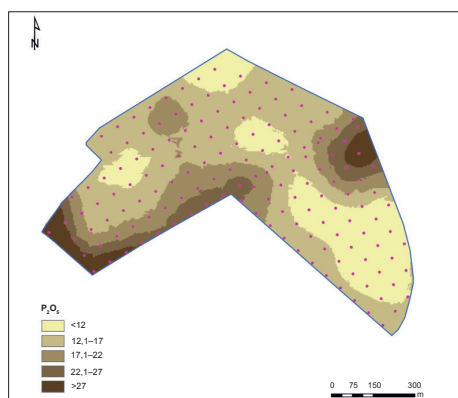
Spektrofotometr VIS-NIR



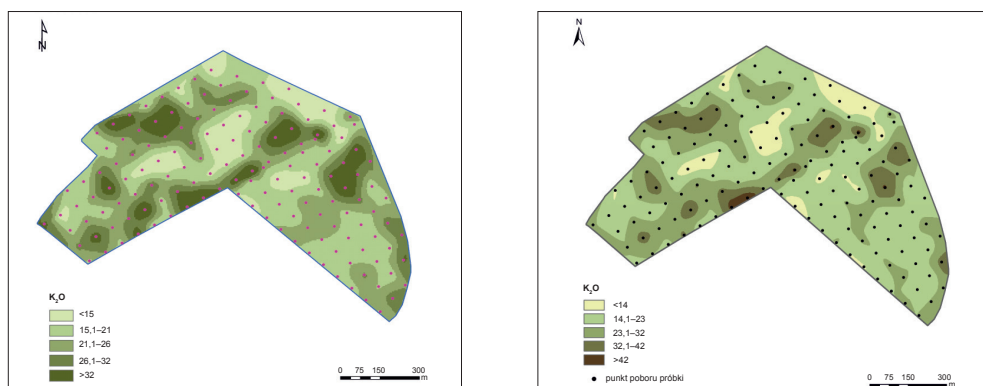
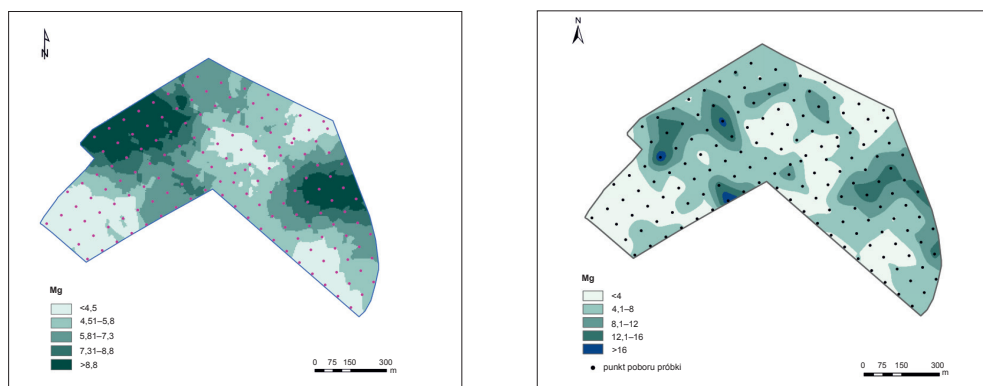
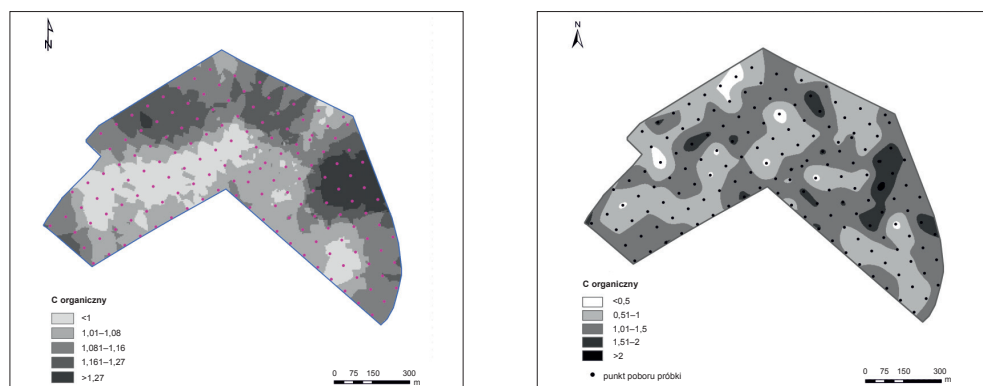
Zawartość części spalwalnych (%)



Odczyn (pH w 1 M KCl)



Zawartość P₂O₅ (mg 100 g⁻¹ gleby)

Zawartość K_2O ($mg\ 100\ g^{-1}$ gleby)Zawartość Mg ($mg\ 100\ g^{-1}$ gleby)Zawartość C_{org} (%)

Rys. 4. Mapy zawartości części spalwialnych oraz właściwości agrochemicznych gleb w stałych punktach siatki geostatystycznej, wygenerowane na podstawie oznaczeń metodami chemicznymi i za pomocą spektrofotometru VIS-NIR w warunkach laboratoryjnych

Źródło: opracowanie własne

Pomiary łanu w okresie wegetacji

W rolnictwie precyzyjnym do charakteryzowania właściwości łanu roślin wykorzystuje się znajomość proporcji i wzajemnych zależności między ilością światła pochłanianego (lub odbitego) przez rośliny przy różnych długościach fal. Uzyskany wynik wyrażany jest za pomocą wskaźników roślinności.

W polach pszenicy ozimej, tj. w latach 2013 (pole nr 5), 2014 (pole nr 7) i 2015 (pole nr 6), dwukrotnie w okresie wegetacji, tj. w fazie strzelania w źdźbło (BBCH 32) i w fazie widocznego liścia flagowego (BBCH 39), wykonywano ocenę stanu roślin na podstawie pomiarów indeksu SPAD za pomocą przyrządu Hydro N-tester SPAD 502, indeksu LAI – LI-2000 oraz wskaźnika NDVI – SpectroSense2.

Przyrząd Hydro N-Tester SPAD-502 mierzy różnice w absorpcji światła przez liść przy długości fali 650 i 940 nm (fot. 1). Iloraz tych różnic stanowi indeks zieloności liścia. Długość fali 650 nm jest zbliżona do maksymalnej absorpcji światła przez chlorofil a (680 nm) i chlorofil b (660 nm), natomiast 940 nm to promieniowanie w zakresie bliskiej podczerwieni, którego absorpcja przez liść jest bardzo niewielka i wynosi ok. 10%. Końcowy wynik pomiarów stanowi średnią z 30 prawidłowych pojedynczych pomiarów, dokonywanych na kolejnych, w pełni rozwiniętych liściach. Wynik podawany jest w jednostkach zwanych jednostkami SPAD (*Soil-Plant Analysis Development*).

Instrument LI-2000 firmy Li-Cor Inc. (fot. 2) służy do pomiaru indeksu powierzchni liści LAI, tzn. stosunku powierzchni liści do powierzchni gleby. Przyrząd wyposażony jest w sensor, złożony z pięciu pierścieni, z których każdy rejestruje promieniowanie świetlne w określonym przedziale kąta zenitalnego. Dane z poszczególnych pierścieni oraz pomiaru kalibracyjnego są podstawą do obliczeń indeksu LAI.



Fot. 1. Hydro N-Tester SPAD-502

Źródło: Zasoby Z-du Żywnienia Roślin
i Nawożenia IUNG-PIB



Fot. 2. LI-2000

Źródło: Mikołowicz P.

Instrument SpectroSense2 (fot. 3) służy do pomiaru wskaźnika NDVI. Dzięki systemowi wymiennych sensorów przystosowanych do różnych zakresów promieniowania, urządzenie ma możliwość wykonywania pomiarów charakterystyk promieniowania w szerokim zakresie częstotliwości. Zestaw do pomiaru wskaźnika NDVI wyposażony jest w dwa sensory, z których każdy rejestruje promieniowanie o długościach fali 650 nm i 800 nm. Jeden z nich działa jako sensor referencyjny, mierząc całość promieniowania docierającego do roślin, a drugi mierzy promieniowanie odbite od roślin. Szerokość pasm w powyższych sensorach wynosi ± 10 nm.



Fot. 3. SpectroSense2 w zestawie przystosowanym do pomiarów NDVI

Źródło: www.skyeinstruments.info (13)

Urządzenie umożliwia szybkie i proste wykonywanie pomiarów. Wartości wskaźnika NDVI wyświetlane są na ekranie, a zapis danych odbywa się za pomocą jednego przycisku. Urządzenie nie posiada jednak własnego źródła światła i dlatego może być wrażliwe na zmiany natężenia promieniowania oraz kąt padania promieni słonecznych. Dokładne ustawienie sensorów względem łanu roślin jest możliwe dzięki teleskopowej lancy z poziomą.

Zróżnicowanie wskaźników stanu roślin pszenicy ozimej w okresie wegetacji zależało od roku i pola, na którym była uprawiana oraz od fazy rozwojowej, w której wykonywano pomiar (tab. 4, 5, 6). Spośród wskaźników stanu roślin pszenicy ozimej w okresie wegetacji najbardziej zróżnicowany był indeks LAI, a najmniej wskaźnik NDVI. Największe zróżnicowanie obu wskaźników stwierdzono w polu nr 6 (2015 r.), gdzie w przypadku indeksu LAI wynosiło ono ok. 35% w fazie strzelania w źdźbło i ok. 29% w fazie liścia flagowego, a dla NDVI wahało się odpowiednio od ok. 9% do 4%. Zmienność indeksu LAI w pozostałych polach (nr 5 i 7) utrzymywała się na poziomie od ok. 25-22% do 22-26%, a wskaźnika NDVI wahała się od 6-4,5% do 9-4%.

Zróżnicowanie indeksu SPAD, charakteryzującego stan zieloności liścia związanego ze stanem odżywienia azotem, było stosunkowo niewielkie. W fazie strzelania

w źdźbło wahało się od ok. 6,4% w polu nr 7 (2014 r.) do ok. 11% w pozostałych polach, a w fazie liścia flagowego od ok. 7% w polu nr 6 (2015 r.) do ok. 8% w polach nr 5 (2013 r.) i 7 (2014 r.).

Tabela 4

Charakterystyka statystyczna parametrów stanu łanu pszenicy ozimej w okresie wegetacji w punktach pomiarowych pola nr 5 w roku 2013 (19,7 ha)

Miara statystyczna	SPAD		LAI		NDVI	
	Faza rozwojowa					
	BBCH 32*	BBCH 39**	BBCH 32	BBCH 39	BBCH 32	BBCH 39
Liczebność	38					
Średnia	590	589	3,10	4,47	0,88	0,89
Mediana	609	596	3,17	4,53	0,89	0,90
Odchylenie standardowe	63,8	48,5	0,77	1,02	0,05	0,04
Współczynnik zmienności	10,8	8,24	24,9	22,7	5,72	4,45
Minimum	426	485	1,74	2,17	0,62	0,72
Maksimum	664	662	4,21	6,28	0,92	0,94

*Faza strzelania w źdźbło; **Faza widoczny liść flagowy

Źródło: opracowanie własne

Tabela 5

Charakterystyka statystyczna parametrów stanu łanu pszenicy ozimej w okresie wegetacji w punktach pomiarowych pola nr 6 w roku 2015 (19,7 ha)

Miara statystyczna	SPAD		LAI		NDVI	
	Faza rozwojowa					
	BBCH 32*	BBCH 39**	BBCH 32	BBCH 39	BBCH 32	BBCH 39
Liczebność	38					
Średnia	628	682	4,39	5,79	0,86	0,89
Mediana	636	683	4,51	5,37	0,87	0,91
Odchylenie standardowe	70,2	48,0	1,53	1,67	0,08	0,04
Współczynnik zmienności	11,2	7,04	34,8	28,8	9,22	4,25
Minimum	472	566	2,16	2,74	0,68	0,80
Maksimum	729	782	7,27	9,50	0,99	0,94

*Faza strzelania w źdźbło; **Faza widoczny liść flagowy

Źródło: opracowanie własne

Tabela 6

Charakterystyka statystyczna parametrów stanu ładu pszenicy ozimej w okresie wegetacji w punktach pomiarowych pola nr 7 w roku 2014 (31,1 ha)

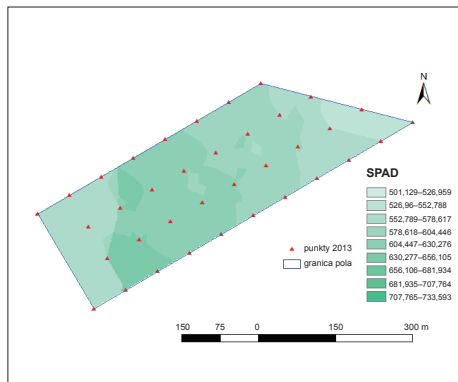
Miara statystyczna	SPAD		LAI		NDVI	
	Faza rozwojowa					
	BBCH 32*	BBCH 39**	BBCH 32	BBCH 39	BBCH 32	BBCH 39
Liczebność	60					
Średnia	603	617	2,85	3,79	0,79	0,88
Mediana	602	614	2,72	3,59	0,81	0,89
Odchylenie standardowe	38,8	46,7	0,64	0,97	0,07	0,03
Współczynnik zmienności	6,44	7,57	22,4	25,6	8,57	3,85
Minimum	465	485	1,79	2,26	0,64	0,72
Maksimum	705	745	4,79	6,63	0,90	0,94

*Faza strzelania w źdźbło; **Faza widoczny liść flagowy

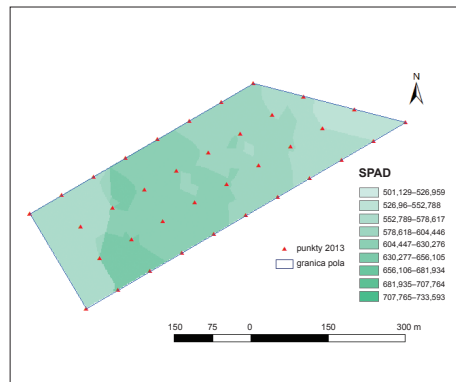
Źródło: opracowanie własne

Na podstawie punktowych pomiarów ładu pszenicy ozimej w okresie wegetacji wygenerowano odpowiednie mapy stanu roślin (rys. 5-7).

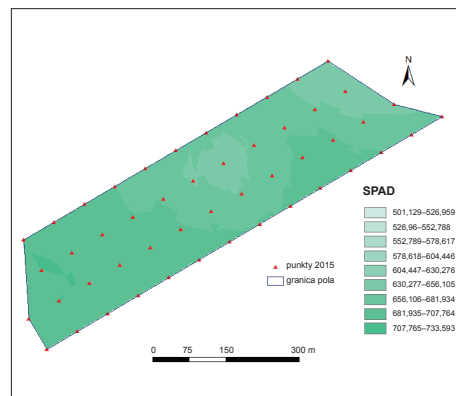
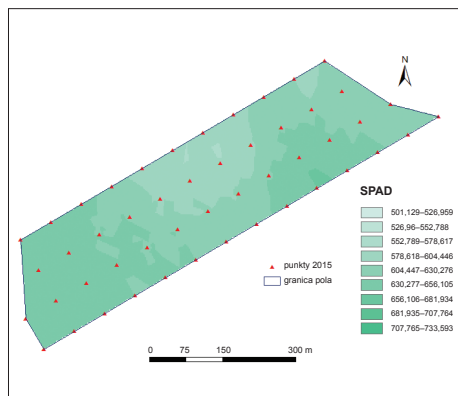
Faza strzelania w żdźbło (BBCH 32)



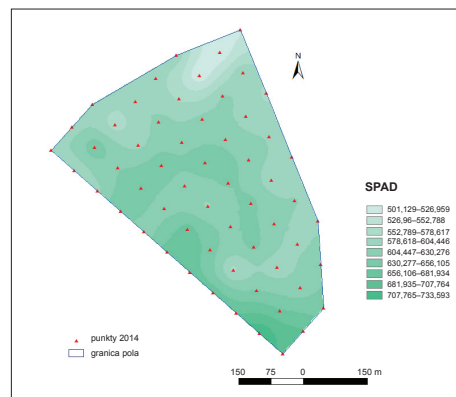
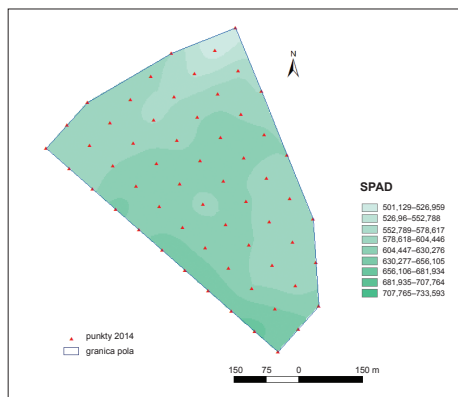
Faza widoczny liść flagowy (BBCH 39)



Pole nr 5 (2013 r.)



Pole nr 6 (2015 r.)

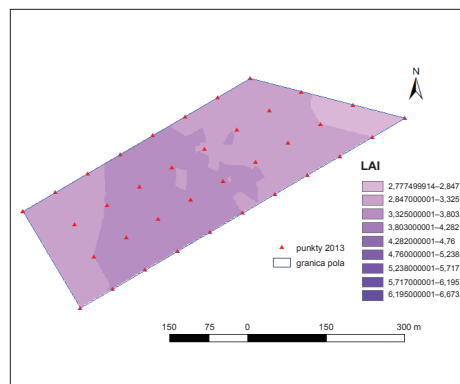


Pole nr 7 (2014 r.)

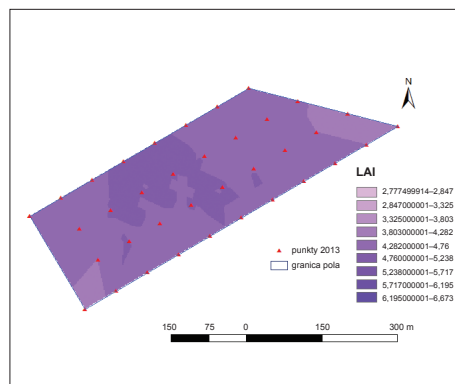
Rys. 5. Mapy SPAD w punktach siatki geostatystycznej

Źródło: opracowanie własne

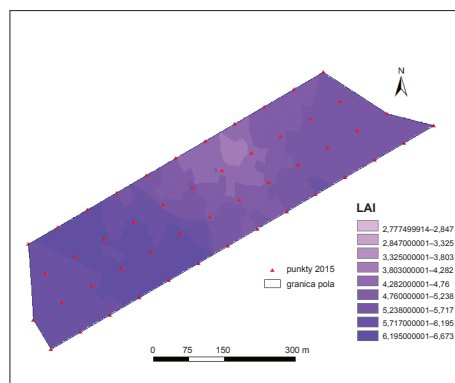
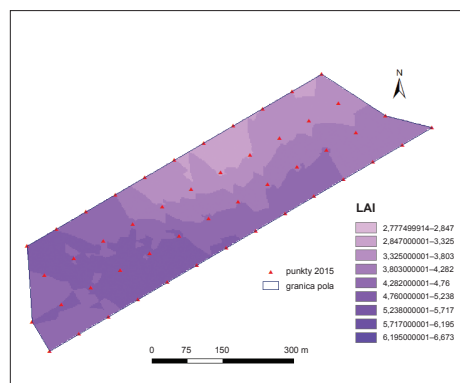
Faza strzelania w żdźbło (BBCH 32)



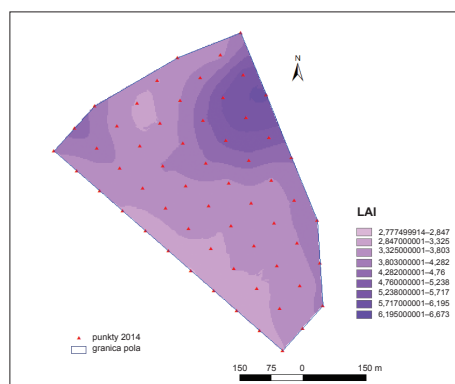
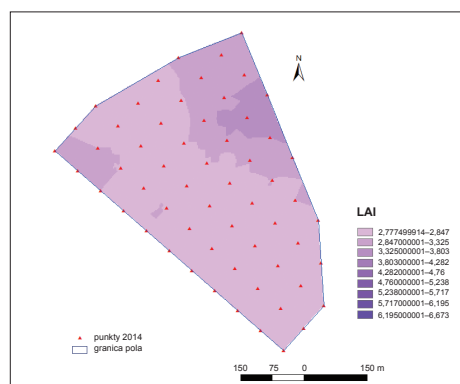
Faza widoczny liść flagowy (BBCH 39)



Pole nr 5 (2013 r.)



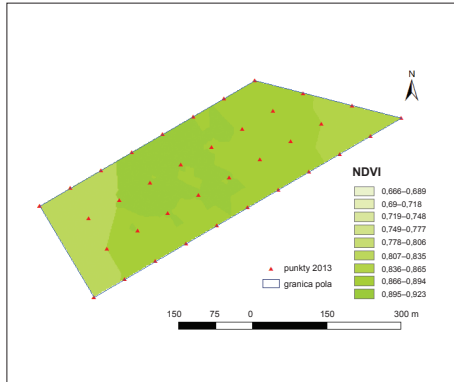
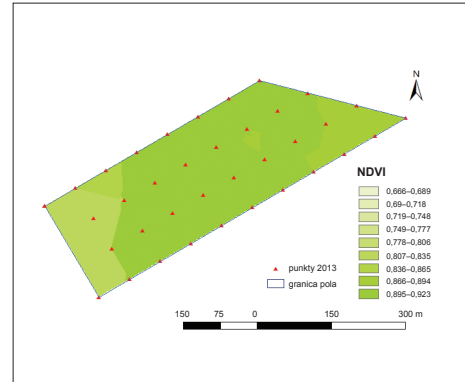
Pole nr 6 (2015 r.)



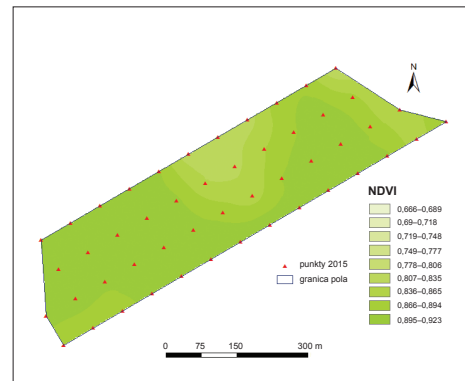
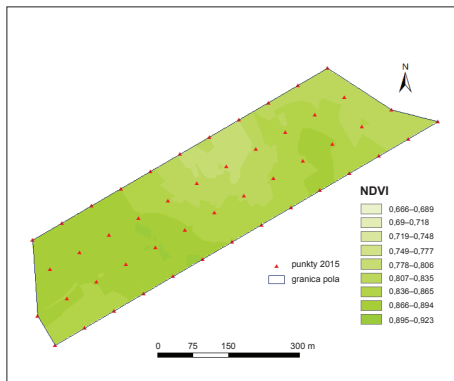
Pole nr 7 (2014 r.)

Rys. 6. Mapy LAI w punktach siatki geostatystycznej

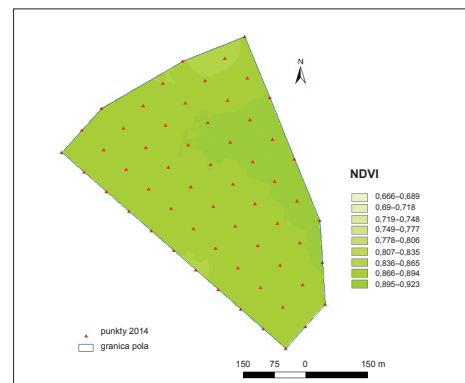
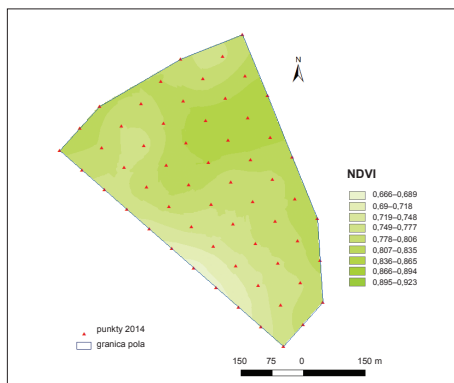
Źródło: opracowanie własne

Faza strzelania w źdźbło (BBCH 32)

Faza widoczny liść flagowy (BBCH 39)


Pole nr 5 (2013 r.)



Pole nr 6 (2015 r.)



Pole nr 7 (2014 r.)

Rys. 7. Mapy NDVI w punktach siatki geostatystycznej

Źródło: opracowanie własne

Plon ziarna pszenicy ozimej

Po zbiorze roślin z powierzchni 1 m², w każdym punkcie siatki geostatystycznej określono plon ziarna w g z 1m² przy 15% wilgotności, a następnie wykonano odpowiednie mapy.

Przestrzenna zmienność plonu pszenicy ozimej była różna zależnie od pola (tab. 7). Największe zróżnicowanie (28,4%) stwierdzono w polu nr 6 w 2015 r. Mniejsze zróżnicowanie (19,4%) wystąpiło w polu nr 5 w roku 2013, a najmniejsze (12,4%) w polu nr 7 w roku 2014.

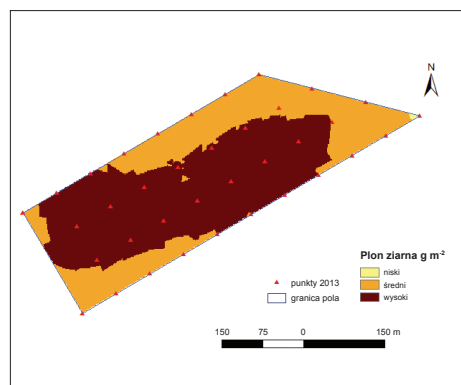
Tabela 7

Charakterystyka statystyczna plonu ziarna pszenicy ozimej
w punktach pomiarowych pól płodozmiennych

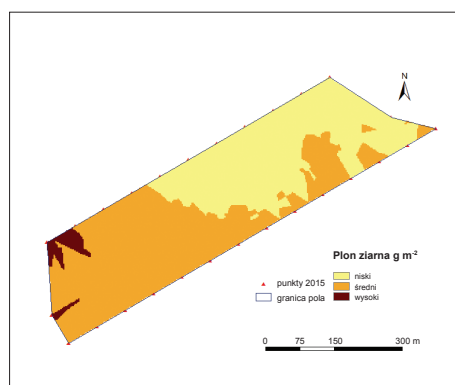
Miara statystyczna	Plon ziarna (g m ⁻²)		
Nr pola (rok zbioru)	5 (2013)	6 (2015)	7 (2014)
Liczebność	38	38	60
Średnia	562	504	625
Mediana	581	463	631
Odchylenie standardowe	109	143	77,4
Współczynnik zmienności	19,4	28,4	12,4
Minimum	273	278	442
Maksimum	751	800	753

Źródło: opracowanie własne

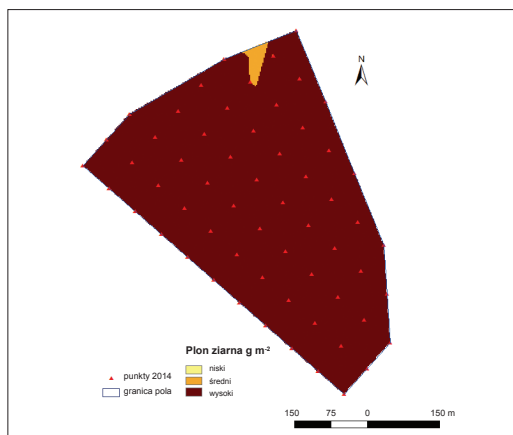
Opisaną wyżej zmienność plonu ziarna pszenicy ozimej w polach płodozmiennych zobrazowano w formie map na rys. 8.



Pole nr 5 (2013 r.)



Pole nr 6 (2015 r.)



Pole nr 7 (2014 r.)

Rys. 8. Mapy plonów ziarna (g m^{-2}) pszenicy ozimej w latach 2013-2015

Źródło: opracowanie własne

Pomiary przestrzennej zmienności pola metodami „on-the-go”

Pomiary ciągłe gleby z zastosowaniem spektrofotometru VIS-NIR

Zastosowanie w badaniach spektrofotometru bliskiej podczerwieni NIR oraz światła widzialnego VIS umożliwia pomiary spektralne gleb w celu określenia m.in. odczynu gleb niektórych makroelementów oraz zawartości węgla organicznego (5).

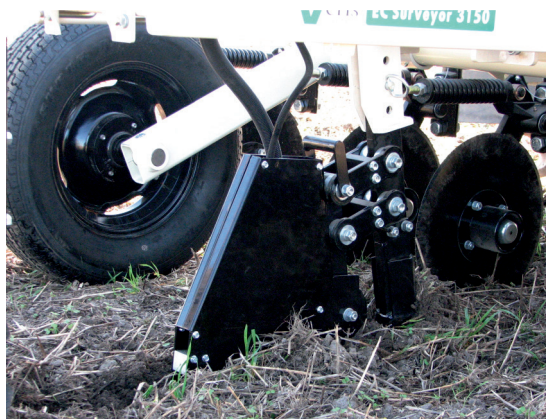
System pomiarowy Veris składa się ze spektrofotometru oraz platformy jezdnej, mocowanej do ciągnika (fot. 4). Głównym elementem umożliwiającym pomiary spektralne jest specjalnie skonstruowany lemiesz, w którym znajduje się lampa halogenowa jako źródło światła (fot. 5). Podczas jazdy lemiesz zagłębia się na głębokość ok. 5-7 cm. Dzięki temu pomiar wykonywany jest w warstwie powierzchniowej gleby.

Lampa oświetla powierzchnię gleby, a światło, które odbija się od gleby poprzez przewody światłowodowe, pada na detektory umieszczone w spektrofotometrze. Spektrofotometr mierzy ilość światła odbitego oraz absorbowanego przez glebę.



Fot. 4. Pomiar właściwości spektralnych gleb systemem Veris (spektrofotometr VIS-NIR)
Veris Technologies, Inc. 601 N. Broadway Salina KS 67401

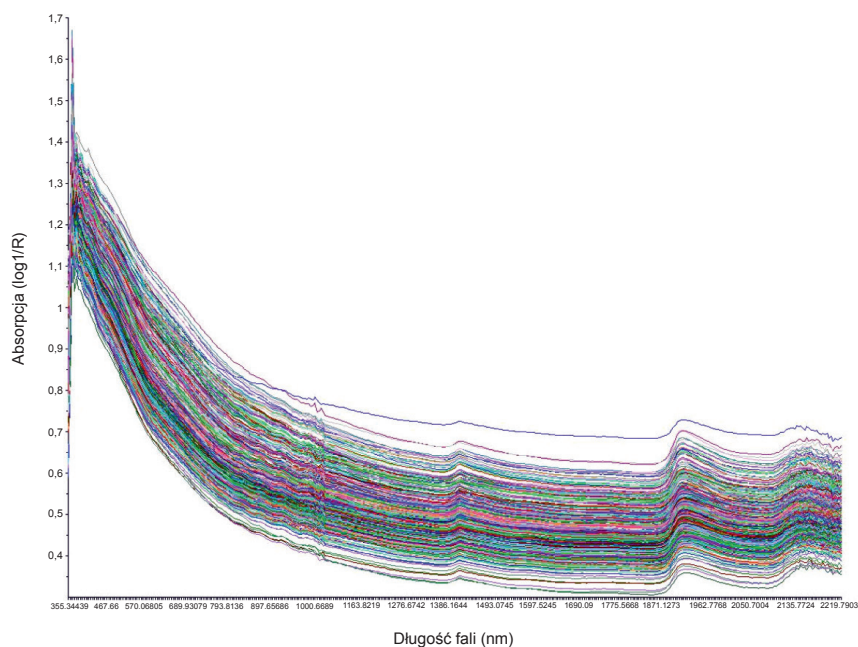
Źródło: Pecio A.



Fot. 5. Lemiesz z umieszczoną wewnątrz lampą halogenową podczas pomiarów spektralnych
Źródło: Pecio A.

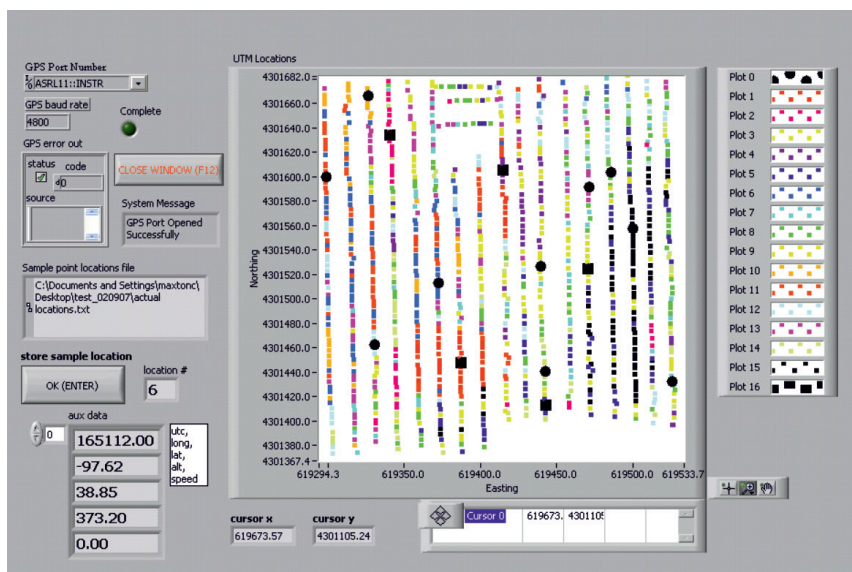
Zakres pomiarowy spektrofotometru Veris wynosi od 350 do 2200 nm. W każdej sekundzie system Veris rejestruje 20 widm glebowych, a każde zawiera 386 pomiarów gleby (rys. 9). Z tego powodu do obróbki takiej ilości danych spektralnych wymagana jest, oprócz specjalistycznego oprogramowania chemometrycznego, bardzo duża moc obliczeniowa komputera zbierającego i przetwarzającego te dane.

Oprogramowanie systemu Veris (Spectrophotometer Software V1.69.) umożliwia wstępne gromadzenie i przetwarzanie danych spektralnych, a także wskazuje lokalizację miejsc na polu do poboru próbek glebowych do kalibracji (fot. 6). Wyniki analiz laboratoryjnych tych próbek mogą być następnie wykorzystane do kalibracji danych spektralnych badanych właściwości.



Rys. 9. Widma spektralne badanych gleb – [R – światło odbite]

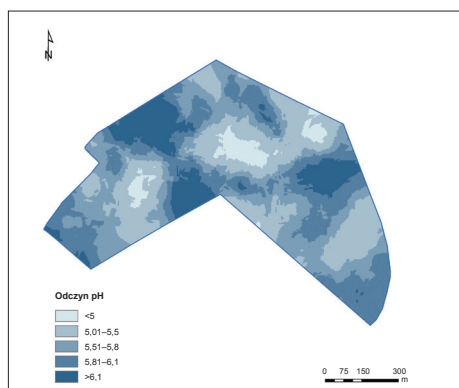
Źródło: opracowanie własne



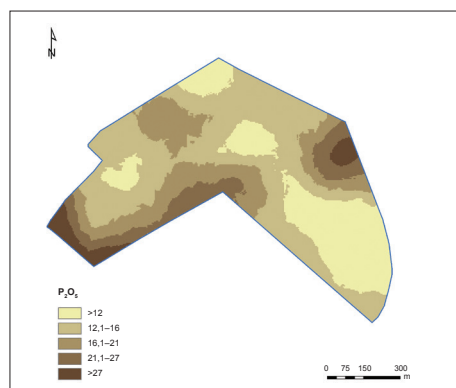
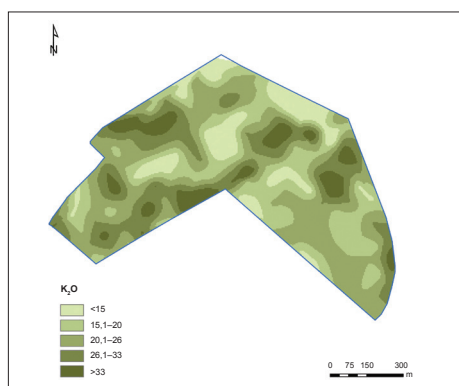
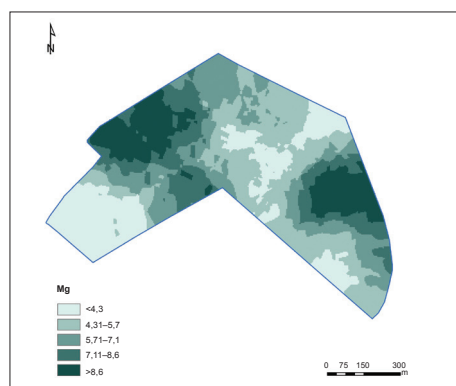
Fot. 6. Oprogramowanie Veris umożliwiające lokalizację miejsc poboru próbek do kalibracji

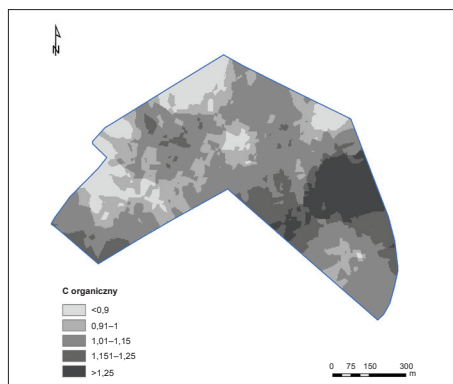
Źródło: opracowanie własne (zrzut z ekranu)

Spektrofotometr VIS-NIR umożliwia wykonywanie badań wielkoobszarowych w krótkim czasie. Ponadto, pomiary te są bezinwazyjne oraz tanie. Mogą być prowadzone przy okazji wykonywania innych zabiegów agrotechnicznych. Urządzenie współpracuje z GPS, co umożliwia sporządzanie cyfrowych map badanych właściwości gleby. Zaletą systemu Veris jest możliwość określenia wielu parametrów glebowych podczas jednego przejazdu. Dzięki zastosowaniu spektrofotometru NIR-VIS do badań przestrzennej zmienności różnych cech glebowych, możliwe jest znaczne obniżenie kosztów związanych z pobieraniem, a następnie analizowaniem próbek w laboratorium. Poniżej przedstawiono mapy zmienności pH, zasobności gleby w makroelementy i C_{org} (rys. 10).



Odczyn (pH w 1 M KCl)

Zawartość P_2O_5 (mg 100 g⁻¹ gleby)Zawartość K_2O (mg 100 g⁻¹ gleby)Zawartość Mg (mg 100 g⁻¹ gleby)

Zawartość C_{org} (%)

Rys. 10. Mapy pH oraz zawartości P_2O_5 , K_2O , Mg i C_{org} w glebie wygenerowane na podstawie ciągłych pomiarów spektrofotometrem w polach płodozmiennych

Źródło: opracowanie własne

Pomiary ciągłe łanu za pomocą instrumentu GreenSeeker – wskaźnik NDVI

Pomiary ciągłe wskaźnika NDVI wykonywano za pomocą instrumentu GreenSeeker® Model 500/505, wyprodukowanego przez firmę NTech Industries Inc. przy współpracy z Uniwersytetem w Oklahoma (fot. 7). Urządzenie jest przystosowane do montażu na pojazdach i sprzęcie rolniczym (ciągnik, opryskiwacz itp.). W skład wyposażenia wchodzi specjalny pakiet oprogramowania umożliwiający tworzenie mapy przestrzennego rozkładu mierzonych wskaźników wegetacji oraz system doradztwa nawozowego opracowany przez naukowców z Oklahoma. Niezbędna jest również antena GPS.

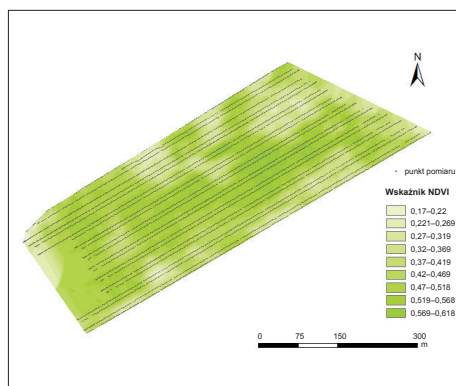


Fot. 7. GreenSeeker RT 200 (NTech, USA) podczas pomiarów „on-the-go”

Źródło: Niedźwiecki J., Mikołowicz P.

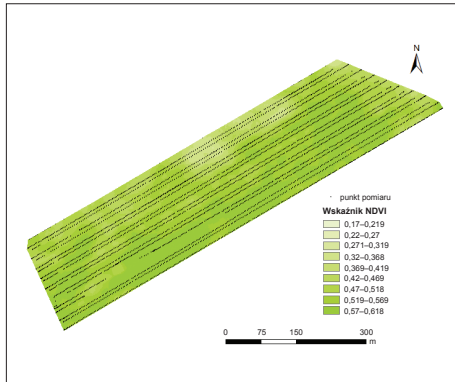
GreenSeeker jest tak zwanym „sensorem aktywnym”, tzn. posiada własne źródło światła. Optyczno-elektroniczny układ emituje światło o dwóch długościach fal 656 nm i 770 nm. Wyemitowane światło, po odbiciu od określonej powierzchni, trafia do detektora, który analizuje jego charakterystykę. Zaletą takiego rozwiązania jest uniezależnienie się od naturalnego źródła światła, jakim jest słońce. Pomiary tym urządzeniem przeprowadzać można w każdych warunkach pogodowych, o każdej porze dnia i po zmierzchu, bez ryzyka popełnienia błędu. Ogromną zaletą urządzenia jest prostota obsługi. Zastosowanie komputera typu palmtop, wyposażonego w system operacyjny „Windows® Mobile” jako interfejsu komunikującego się z komputerem urządzenia oraz gromadzącego dane, powoduje, że obsługa jest bardzo intuicyjna. Dane zapisywane są w formacie plików tekstowych (txt), umożliwiającich bezpośrednie przenoszenie do arkuszy kalkulacyjnych.

Uzyskane wyniki pomiarów NDVI posłużyły do wygenerowania map przestrzennej zmienności tego wskaźnika (rys. 10). Mapy przestrzennej zmienności indeksu NDVI wykonano dla pól produkcyjnych w kluczowych dla rozwoju pszenicy fazach fenologicznych: dla pola nr 5 (2013 r.) w fazie dojrzałości mleczej (BBCH 73), a dla pól nr 7 (2014 r.) i nr 6 (2015 r.) w fazie strzelania w źdźbło (BBCH 32) i liścia flagowego (BBCH 39).

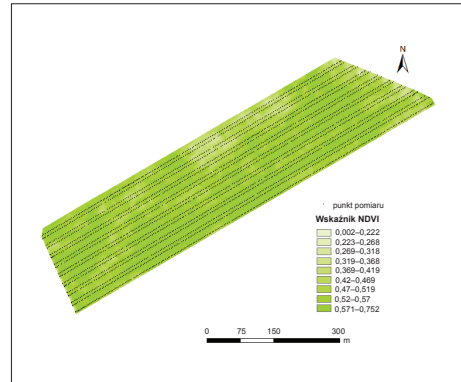


Pole nr 5 (2013 r.) – początek fazy dojrzałości mleczej (BBCH 73)

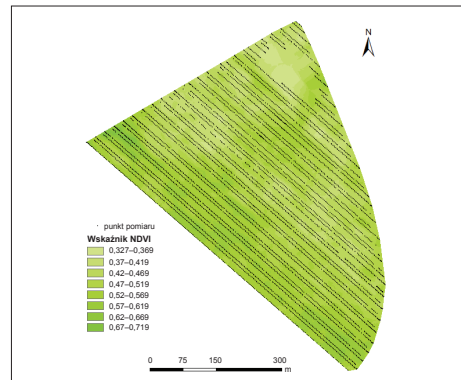
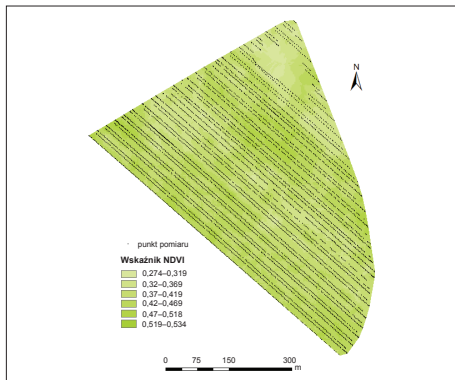
Faza strzelania w źdźbło (BBCH 32)



Faza widoczny liść flagowy (BBCH 39)



Pole nr 6 (2015 r.)



Pole nr 7 (2014 r.)

Rys. 10. Mapy NDVI wygenerowane na podstawie pomiarów instrumentem GreenSeeker umocowanym na ciągniku

Źródło: opracowanie własne

Na podstawie uzyskanych map indeksu NDVI stwierdzono, że znacznie niższe wartości pokrywały się z obszarami występowania gleb najlżejszych.

Podsumowanie

Badania prowadzono na terenie specjalistycznej Stacji Doświadczalnej IUNG-PIB w Baborówku, koło Poznania, w latach 2013-2015, na polu o łącznej powierzchni ok. 78,5 ha. W pracy przedstawiono wyniki rozpoznania przestrzennego zróżnicowania właściwości gleby i łanu pszenicy ozimej, w tym plonu ziarna, z zastosowaniem klasycznej metody badań w stałej sieci 154 punktów pomiarowych oraz innowacyjnych metod „on-the-go”. Rozpoznanie to przeprowadzono w celu określenia przestrzennie zróżnicowanych dawek nawożenia pod pszenicę ozimą.

Już wstępna analiza pola na podstawie mapy glebowo rolniczej wykazała bardzo duże zróżnicowanie gleb zarówno pod względem typologicznym, jak i granulometrycznym. Potwierdziła to analiza składu granulometrycznego wykonana metodą laserową, która wykazała ok. 10-procentową średnią zawartość części spławianych. Na tej podstawie glebę całego pola zaliczono do kategorii gleb bardzo lekkich, przy czym zmienność tego parametru wynosiła ok. 50%. Analizy gleb w punktach siatki wykazały średnią wartość pH 5,6, co pozwoliło zaliczyć ją do gleb lekko kwaśnych, wysoką zawartość P_2O_5 , bardzo wysoką zawartość K_2O , wysoką zawartość Mg oraz niską zawartość próchnicy.

Średni plon ziarna pszenicy ozimej oznaczany w punktach pomiarowych kolejnych pól płodozmiennych w latach 2013-2015 wynosił ok. 560 g m^{-2} przy zmienności ok. 22%. Zmienność elementów plonu wahała się od ok. 10% dla MTZ do 25% dla plonu słomy z 1 m^2 . Zróżnicowanie wskaźników stanu roślin w okresie wegetacji wahało się od 5% do 10% dla NDVI, poprzez ok. 10% dla indeksu SPAD, do ponad 30% w przypadku indeksu LAI.

Opisaną zmienność zobrazowano w formie map. Stwierdzono, że w badaniach przestrzennej zmienności gleby oraz łanu w obrębie pola jednakowo przydatne są metody analizy w stałych punktach pomiarowych oraz pomiarów ciągłych. Bardzo duże zróżnicowanie właściwości gleb i roślin w obrębie badanego pola uzasadnia potrzebę różnicowania dawek nawożenia.

Literatura

1. Arslan D., Colvin T.: Grain yield mapping, yield sensing, yield reconstruction and errors. *Precis. Agric.*, 2002, **3**: 135-154.
2. Chang C.W., Laird D.A.: Near-infrared reflectance spectroscopy analysis of soil C and N. *Soil Sci.*, 2002, **167**: 110-116.
3. Christy C.D.: Real-time measurement of soil attributes using on-the-go near infrared reflectance spectroscopy. *Comput. Electr. Agric.*, 2008, **61**: 10-19.
4. Debaene G., Niedźwiecki J., Pecio A., Żurek A.: Effect of the number of calibration samples on the prediction of several soil properties at the farm-scale. *Geoderma*, 2014-2015(2014): 114-125.

5. Debaene G., Niedźwiecki J., Pecio A.: Reducing cost of soil mapping using VIS-NIRS technology. International Conference on "Protection of soil functions – challenges for the future", 15th-18th October 2013, Puławy, Poland, 21-23.
6. Debaene G., Niedźwiecki J., Pecio A.: Visible and Near-infrared spectrophotometer for soil analysis: preliminary results. *Pol. J. Agron.*, 2010, **3**: 3-9.
7. Fotyma M., Pecio A.: Przestrzenna zmienność żyzności i produktywności gleby w obrębie pola produkcyjnego. *Nawozy i Nawożenie/Fertilizers and Fertilization*, 2010, **41**: 26-42.
8. Jadczyzyn T.: Ustalanie dawek nawozów P, K, Mg w rolnictwie precyzyjnym. *Nawozy i Nawożenie/Fertilizers and Fertilization*, 2010, **41**: 43-50.
9. Lesch S.M., Corwin D.L., Robinson D.A.: Apparent soil electrical conductivity mapping as an agricultural management tool in arid zone soils. *Comput. Electr. Agric.*, 2005, **46**: 351-378.
10. Mistele B., Gutser R., Schmidhalter U.: Validation of field-scaled spectral measurements of the nitrogen status in winter wheat. [In:] Programme book of the 7th International Conference on Precision Agriculture. 25-28 July 2004, Minneapolis, MN, USA, 1187-1195.
11. Niedźwiecki J., Debaene G., Pecio A.: Klasyczne i zaawansowane metody badania przestrzennego zróżnicowania żyzności gleby i łanu roślin. *Studia i Raporty IUNG-PIB*, Puławy, 2015, **42(16)**: 69-90.
12. Sudduth K.A., Hummel J.W., Birrell S.J.: Sensors for site-specific management. [In:] Pierce F.J., Sadler E.J. (red.), *The State of Site-Specific Management for Agriculture*. ASA/CSSA/SSSA, Madison, WI, 1997, 183-210.
13. www.skyeinstruments.info

Adres do korespondencji:

prof. dr hab. Alicja Pecio
Zakład Żywienia Roślin i Nawożenia
IUNG-PIB
ul. Czartoryskich 8
24-100 Puławy
tel. 81 47 86 834
e-mail: Alicja.Pecio@iung.pulawy.pl

Alicja Pecio, Jacek Niedźwiecki

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

OCENA POTRZEB NAWOŻENIA W ROLNICTWIE PRECYZYJNYM*

Słowa kluczowe: dawki nawozów, rolnictwo precyzyjne, doradztwo nawozowe

Wstęp

Koncepcja rolnictwa precyzyjnego polega na różnicowaniu zabiegów agrotechnicznych, zwłaszcza nawożenia, w obrębie jednego pola o zróżnicowanej pokrywie glebowej (5). Idea tego systemu wywodzi się z oceny, że zmienność siedliskowa powoduje zmienność we wzroście i rozwoju roślin, a przez to również zmienność plonu końcowego. Jednolita agrotechnika w obrębie pola o zróżnicowanych warunkach glebowych prowadzi do zmniejszenia średniego plonu i często nadmiernego zużycia środków produkcji. Dotyczy to w pierwszym rzędzie nawozów mineralnych. Zatem podstawowym założeniem rolnictwa precyzyjnego jest dostosowanie zabiegów agrotechnicznych do zmienności uprawianego pola, w celu zwiększenia efektywności ich działania, ograniczenia zużycia środków produkcji, a efektem – poprawa plonowania roślin, zwiększenie opłacalności produkcji, a także zmniejszenie presji na środowisko poprzez lepsze wykorzystanie nawozów i środków ochrony roślin. Do tej pory nie było to możliwe, ponieważ pole traktowano jako całość, a jako podstawę wyznaczania dawek nawozów przyjmowano średnią dla całego pola zasobność gleb w składniki pokarmowe.

Celem badań było porównanie potrzeb wapnowania oraz dawek nawożenia azotem, fosforem, potasem i magnezem pod pszenicę ozimą, określonych na podstawie szczegółowej analizy przestrzennej zmienności plonu ziarna i właściwości agrochemicznych wierzchniej warstwy gleby w stałej sieci punktów pomiarowych oraz metodą tradycyjną, uwzględniającą wartości średnie dla całego pola.

* Opracowanie wykonano w ramach zadań 1.2 i 1.6 w programie wieloletnim IUNG-PIB.

Metodyka badań

Badania prowadzono w SD IUNG-PIB w Baborówku (16°38'50 E, 52°34'50 N) w latach 2013-2015 na polu o łącznej powierzchni 79,8 ha.

Potrzeby wapnowania oraz dawki składników pokarmowych pod pszenicę ozimą wyznaczano zgodnie z zaleceniami IUNG-PIB (1, 2, 4), na podstawie zasobności gleb oraz plonu. Dawki wapna określano na podstawie oceny potrzeb wapnowania, uwzględniającej odczyn pH i kategorię agronomiczną gleb. Dawki azotu, fosforu i magnezu wyznaczano na podstawie pobrania z plonem głównym, które obliczano jako iloczyn pobrania jednostkowego N, P₂O₅, K₂O i Mg (tab. 1) i plonu ziarna z jednostki powierzchni.

Tabela 1

Pobranie składników mineralnych z plonem głównym pszenicy ozimej (kg·t⁻¹)

Azot (N)	Fosfor P ₂ O ₅	Potas (K ₂ O)	Magnez (Mg)
18,9	8,24	5,16	1,3

Źródło: Jadczyzyn, 2013 (1)

Pobranie skorygowane odpowiednim współczynnikiem, zależnym od zasobności gleby w dany składnik (tab. 2), oznaczało potrzeby nawożenia (3). W przypadku azotu, wartość pobrania była jednoznaczna z potrzebami nawożenia tym składnikiem.

Tabela 2

Wartości współczynników korekcyjnych
zależnie od zasobności gleby w fosfor, potas i magnez

Zasobność	Bardzo niska	Niska	Średnia	Wysoka	Bardzo wysoka
Współczynnik	1,5	1,25	1,0	0,75	0,5

Źródło: Jadczyzyn, 2006 (3)

Ze względu na to, że na polach wszystkich roślin płodozmianu zbierano wyłącznie plon główny, a pozostawioną na polu słomę przyorywano i nie stosowano nawożenia organicznego, jedynym źródłem dopływu składników pokarmowych były nawozy mineralne stosowane w dawkach jednolitych na poszczególnych polach płodozmiennych.

W badaniach uwzględniono dwa sposoby określania potrzeb nawożenia. Dla potrzeb tradycyjnego doradztwa nawozowego uwzględniono średnie wartości dla całego pola. Dla potrzeb doradztwa zgodnie z zasadami rolnictwa precyzyjnego uwzględniono zmienność warunków glebowych i plonu ziarna pszenicy ozimej w stałych punktach pomiarowych. Metody badawcze oraz wyniki rozpoznania tej zmienności opisano szczegółowo w pracy Pecio i in. w tym zeszycie.

Trzy pola (nr 5, 6 i 7), w których kolejno uprawiano pszenicę w latach 2013, 2015 i 2014 obejmowały łącznie 136 punktów, a pole nr 4, przeznaczone pod uprawę kukurydzy, 18 punktów (tab. 3).

Tabela 3

Charakterystyka pól płodozmiennych

Nr pola	4	5	6	7
Rok uprawy pszenicy ozimej	-	2013	2015	2014
Powierzchnia pola (ha)	9,3	19,7	19,7	31,1
Liczba punktów pomiarowych	18	38	38	60

Źródło: opracowanie własne

Zapotrzebowanie na nawozy obliczano jako iloczyn dawki składnika i powierzchni. W przypadku obliczeń tradycyjnych uwzględniono powierzchnie pól przedstawione w tabeli 3. W obliczeniach dla potrzeb rolnictwa precyzyjnego, całkowite zapotrzebowanie na nawozy w poszczególnych polach wyznaczono jako sumę zużycia na poszczególnych powierzchniach reprezentowanych przez punkty pomiarowe (154 punkty, każdy o powierzchni 0,5184 ha). Taki sposób obliczeń był uzasadniony tym, że punkty te były rozmieszczone na polu w oczkach siatki kwadratowej o boku 72 m, a zatem wszystkie punkty reprezentowały jednakową powierzchnię.

Wyniki badań

Właściwości agrochemiczne gleb w obrębie pola oraz plon ziarna pszenicy ozimej określono na podstawie analizy próbek pobranych w stałych punktach pomiarowych. Ocenę kategorii agronomicznych oraz odczynu gleby w obrębie całego pola przeprowadzono na podstawie analizy próbek gleby pobranych w 154 punktach pomiarowych. W ocenie zróżnicowania zasobności gleby w fosfor, potas i magnez uwzględniono wyniki analiz tylko w tych punktach, gdzie określano jednocześnie plon ziarna pszenicy (136 punktów). Wyniki badań wykazywały duże zróżnicowanie przestrzenne. Dlatego też średnie dla poszczególnych pól płodozmiennych często różniły się od rzeczywistych wartości w punktach pomiarowych.

Zróżnicowanie właściwości gleb

Na podstawie analizy składu granulometrycznego gleby, według klasyfikacji zgodnej z normą branżową BN-78/9180-11, stwierdzono, że średnia dla całego pola (154 punkty) zawartość części spławialnych wynosiła ok. 10% (tab. 4). Oznacza to, że gleba należy do kategorii gleb bardzo lekkich. Jednakże współczynnik zmienności – ponad 50% – oznacza bardzo duże zróżnicowanie w obrębie pola.

Tabela 4

Procentowy udział części spławialnych (o średnicy $<0,02$ mm).

Charakterystyka statystyczna (n=154)

Charakterystyka statystyczna	Udział części spławialnych (%)
Średnia	9,75
Mediana	10,0
Odchylenie standardowe	4,9
Współczynnik zmienności	50,3
Minimum	1,7
Maksimum	22,7
Kategoria agronomiczna gleby	bardzo lekkie

Źródło: opracowanie własne

Analiza danych z próbek gleby pobranych w 154 punktach pomiarowych wykazała, że połowa z nich (50%) należała do kategorii gleb lekkich, a druga połowa (49%) – do kategorii gleb bardzo lekkich (tab. 5).

Tabela 5

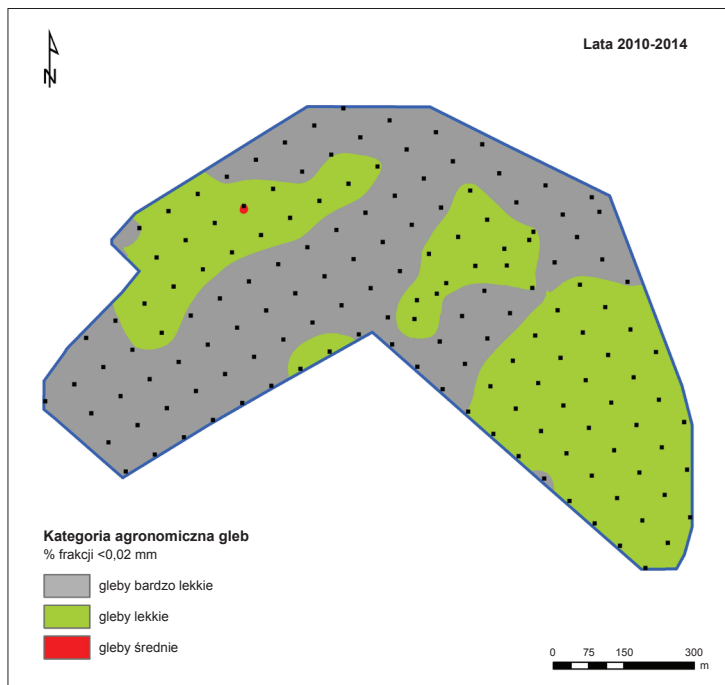
Udział punktów pomiarowych w klasach kategorii agronomicznych gleb

Kategoria agronomiczna	Udział części spławialnych (%)	Punkty pomiarowe	
		liczba	udział (%)
Gleby bardzo lekkie	5,49	77	50
Gleby lekkie	13,94	76	49
Gleby średnie	22,7	1	1
Średnio dla pola		Suma dla pola	
Gleby bardzo lekkie	9,75	154	100

Źródło: opracowanie własne

Gleba pobrana tylko w jednym punkcie należała do kategorii gleb średnich. Był to punkt nr 83 o współrzędnych 52°35'21 N, 16°38'24 (rys. 1).

W glebach trzech pól, na których uprawiano pszenicę (136 punktów), średni udział części spławialnych (10%) wskazywał kategorię gleb bardzo lekkich (tab. 6). Jednakże do tej kategorii należała gleba tylko na polach nr 5 i 6, gdzie średnia zawartość części spławialnych wynosiła odpowiednio 9,4 i 7,9%. Gleba pola nr 7, o zawartości części spławialnych ok. 11,8%, należała do kategorii gleb lekkich. Gleby pola nr 4, przeznaczone pod uprawę kukurydzy, oceniono średnio jako bardzo lekkie. Na każdym z pól stwierdzono jednak duży, aczkolwiek zróżnicowany, udział obu kategorii gleb.



Rys. 1. Mapa kategorii agronomicznych gleb

Źródło: opracowanie własne

Tabela 6

Procentowy udział punktów pomiarowych w klasach kategorii agronomicznych pól płodozmiennych

Nr pola	4	5	6	7	Średnio 5, 6, 7
Gleby bardzo lekkie	78	55	68	27	46
Gleby lekkie	22	42	32	73	53
Gleby średnie	-	3	-	-	1
Zaw. cz. sypław. (%)	7,77	9,36	7,90	11,76	10,0
Kat. agronomiczna gleby	b. lekkie	b. lekkie	b. lekkie	lekkie	b. lekkie

Źródło: opracowanie własne

Średnia wartość pH gleby dla całego pola wynosiła 5,6. Pozwoliło to zaliczyć ją do gleb o odczynie lekko kwaśnym. Stwierdzono ponadto wysoką zawartość P_2O_5 , bardzo wysoką zawartość K_2O i bardzo wysoką zawartość Mg (tab. 7).

Tabela 7

Właściwości agrochemiczne gleby średnio z pola

Cecha	pH KCl n=154	Zawartość mg 100 g ⁻¹ gleby (n=136)		
		P ₂ O ₅	K ₂ O	Mg
Wartość	5,6	15,3	22,6	6,3
Ocena	I. kwaśne	wysoka	b. wysoka	b. wysoka

Źródło: opracowanie własne

Zmienność wartości pH wynosiła ok. 16% i wahała się od 3,6 do 7,6, a zawartość składników pokarmowych od 41% do niemal 62% (tab. 8). Największą zmienność stwierdzono w przypadku zawartości Mg (62%), mniejszą dla zawartości P₂O₅ (56%), a najmniejszą, ale również bardzo dużą, w przypadku zawartości K₂O (41%).

Tabela 8

Zmienność właściwości agrochemicznych gleby w punktach pomiarowych.

Charakterystyka statystyczna

Charakterystyka statystyczna	pH _{KCl}	Zawartość w mg 100 g ⁻¹ gleby		
		P ₂ O ₅	K ₂ O	Mg
Liczebność	154	136	136	136
Średnia	5,6	15,3	22,6	6,35
Mediana	5,7	13,7	20,45	5,20
Odchylenie standardowe	0,89	8,57	9,36	3,92
Współczynnik zmienności	15,7	56,1	41,4	61,8
Minimum	3,6	4,3	6,0	0,40
Maksimum	7,6	67,3	46,9	19,9

Źródło: opracowanie własne

Analiza właściwości chemicznych gleby z podziałem na pola płodozmienne wykazała duże zróżnicowanie pomiędzy średnimi (tab. 9). Gleba na polach nr 4, 5 i 7 wykazywała średnio odczyn lekko kwaśny. Jedynie na polu nr 6 gleba charakteryzowała się odczynem kwaśnym.

Tabela 9

Średni odczyn pH oraz ocena zakwaszenia gleb w polach płodozmiennych

Nr pola	Liczba punktów pomiarowych	pH _{KCl}	Ocena zakwaszenia gleb
4	18	5,7	lekko kwaśne
5	38	5,7	lekko kwaśne
6	38	5,3	kwaśne
7	60	5,8	lekko kwaśne

Źródło: opracowanie własne

Zasobność gleb w fosfor wahała się od średniej do wysokiej, w magnez od bardzo wysokiej do wysokiej, a w potas była bardzo wysoka na wszystkich polach (tab. 10).

Tabela 10

Średnia zasobność gleb pól płodozmiennych w makroelementy

Nr pola	Liczba punktów	Zasobność	P ₂ O ₅	K ₂ O	Mg
5	38	wartość (mg 100 g ⁻¹ gleby)	13,9	21,9	7,97
		ocena	średnia	bardzo wysoka	bardzo wysoka
6	38	wartość (mg 100 g ⁻¹ gleby)	18,3	25,2	5,26
		ocena	wysoka	bardzo wysoka	wysoka
7	60	wartość (mg 100 g ⁻¹ gleby)	14,3	21,4	6,01
		ocena	średnia	bardzo wysoka	wysoka

Źródło: opracowanie własne

Zróznicowanie przestrzenne odczynu gleby w obrębie poszczególnych pól płodozmiennych wahało się od ok. 12% na polu nr 7 do ponad 18% na polach nr 5 i 6. Wartości pH pozostawały w granicach – odpowiednio: 4,2-7,4 oraz 3,6-7,6 i 3,9-7,4 (tab. 11).

Tabela 11

Przestrzenna zmienność odczynu pH gleby w polach płodozmiennych.

Charakterystyka statystyczna

Nr pola	4	5	6	7
Liczebność	18	38	38	60
Średnia	5,7	5,7	5,3	5,8
Mediana	5,6	6,05	5,25	5,9
Odchylenie standardowe	0,74	1,05	0,97	0,71
Współczynnik zmienności	13,0	18,25	18,20	12,2
Minimum	4,20	3,6	3,9	4,2
Maksimum	7,30	7,6	7,4	7,4

Źródło: opracowanie własne

Zróznicowanie przestrzenne zasobności gleby w składniki pokarmowe w obrębie poszczególnych pól płodozmiennych, na których uprawiano pszenicę wynosiło od 31,7% w przypadku potasu w polu nr 7 do 67,5% dla magnezu w polu nr 6. Szczegółowe wartości podano w tabeli 12.

Tabela 12

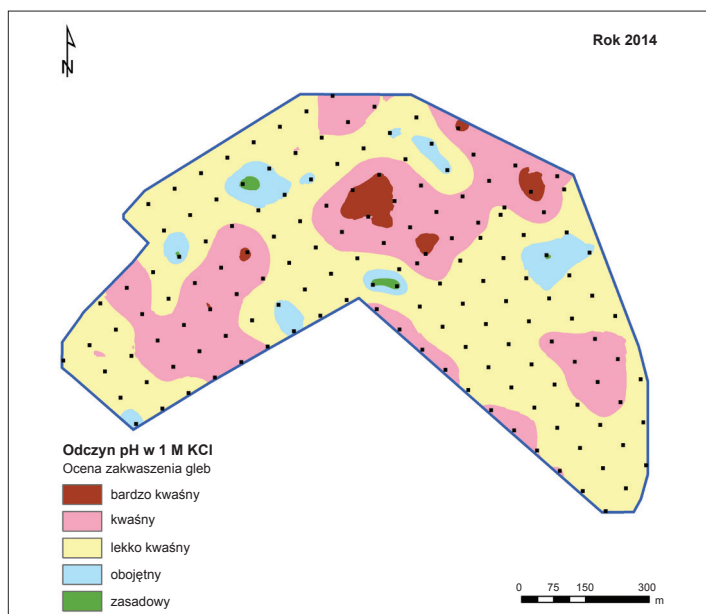
Przestrzenna zmienność zasobności gleby w makroelementy w polach płodozmiennych.

Charakterystyka statystyczna

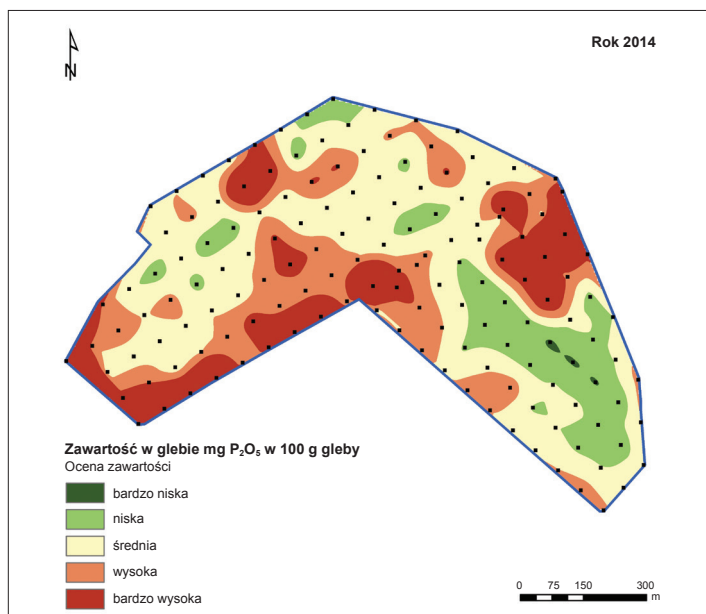
Charakterystyka statystyczna	Pole 5			Pole 6			Pole 7		
	P ₂ O ₅	K ₂ O	Mg	P ₂ O ₅	K ₂ O	Mg	P ₂ O ₅	K ₂ O	Mg
	Zawartość w mg 100 g ⁻¹ gleby								
Liczebność	38	38	38	38	38	38	60	60	60
Średnia	13,9	21,9	7,97	18,3	25,2	5,26	14,3	21,4	6,01
Mediana	12,8	22,1	7,6	15,9	24,0	3,95	12,9	20,0	5,0
Odchylenie stand.	5,85	9,68	4,66	9,47	11,9	3,55	9,08	6,80	3,34
Wsp. zmienności	42,2	44,2	58,5	51,9	47,3	67,5	63,4	31,7	55,5
Minimum	6,7	6,0	0,4	8,20	9,00	1,50	4,3	8,7	1,0
Maksimum	37,5	43,5	19,9	52,3	46,9	19,3	67,3	41,8	14,7

Źródło: opracowanie własne

Na rys. 2 przedstawiono mapy zmienności właściwości agrochemicznych gleb według klas zakwaszenia i zasobności w makroelementy.



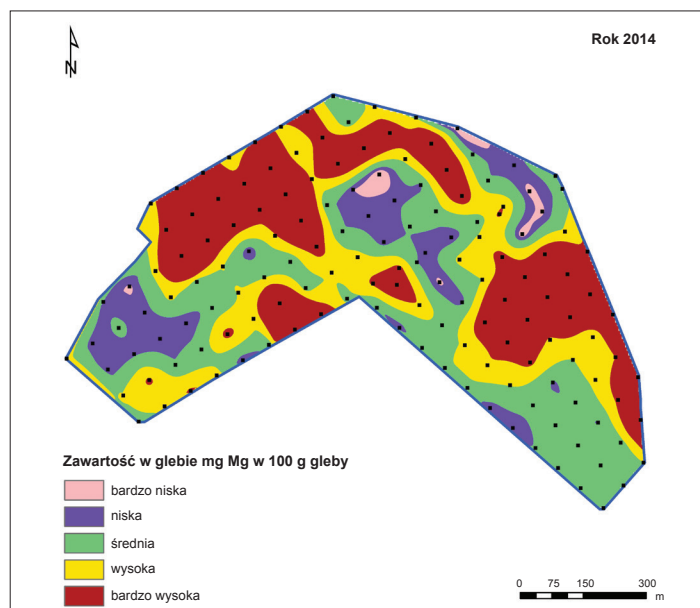
Odczyn gleb



Zasobność w fosfor



Zasobność w potas



Zasobność w magnez

Rys. 2. Mapy klas zakwaszenia oraz zasobności gleb w makroelementy

Źródło: opracowanie własne

Plon ziarna pszenicy ozimej

Średni plon ziarna pszenicy z trzech analizowanych pól (nr 5, 6 i 7), określony na podstawie próbek pobranych z 1 m² w punktach pomiarowych, wynosił 573 g·m⁻². Analiza plonu wykazała jednak zróżnicowanie pomiędzy poszczególnymi polami. Najwyższy średni plon ziarna zebrano z pola nr 7 w roku 2014, a najniższy z pola nr 6 w roku 2015 (tab. 13). Zróżnicowanie plonu ziarna średnio z trzech pól wynosiło 21%. Największe (28%) stwierdzono jednak na polu o najniższych plonach (nr 6), a najmniejsze (12%) w polu o największej produktywności (nr 7). Zakres zmienności w obrębie trzech pól pszenicy łącznie wahał się od 273 g·m⁻² do 800 g·m⁻², przy czym w polu nr 6 wynosił od 278 do 800 g·m⁻², a w polu nr 7 od 442 do 753 g·m⁻².

Tabela 13

Przestrzenna zmienność plonu ziarna pszenicy ozimej (g·m⁻²) na polach płodozmiennych.
Charakterystyka statystyczna

Nr pola (rok)	5-7 (2013-2015)	5 (2013)	6 (2015)	7 (2014)
Powierzchnia (ha)	70,5	19,7	19,7	31,1
Liczebność	136	38	38	60
Średnia	573	562	504	625
Mediana	603	575	463	631
Odchylenie standardowe	118	106	143	77,4
Współczynnik zmienności	20,5	18,9	28,4	12,4
Minimum	273	273	278	442
Maksimum	800	751	800	753

Źródło: opracowanie własne

Odpowiednie mapy zmienności plonu ziarna pszenicy w polach płodozmiennych zamieszczono w pracy *Pecio i in.* w tym zeszycie.

Dawki nawożenia w doradztwie tradycyjnym i precyzyjnym

W tabeli 14 zestawiono średnie potrzeby i dawki wapna, które wskazują, że żadne z pól płodozmiennych nie wymaga wapnowania. Jak wynika z danych przedstawionych w tabelach 7 i 8, średni odczyn pH z łącznej powierzchni 79,8 ha (154 punkty pomiarowe) wynosił 5,6, co dla kategorii agronomicznej – gleby bardzo lekkie – oznacza, że wapnowanie jest zbędne (6). Przypomnieć tu należy, że jak wskazano w tabeli 5, w obrębie całego pola gleby bardzo lekkie stanowiły 49%, a pozostałą

część (50%) – gleby lekkie i średnie (1%). Dla kategorii gleb lekkich średni odczyn pH równy 5,6 oznacza ograniczone potrzeby wapnowania, czyli również zerową dawkę wapna (2). Uogólniając, można uznać, że żadne z pól nie wymagało wapnowania.

Tabela 14

Średnie potrzeby wapnowania w polach płodozmiennych

Nr pola	4	5	6	7	4-7
Powierzchnia pola (ha)	9,3	19,7	19,7	31,1	79,8
Potrzeby wapnowania	zbędne	zbędne	ograniczone	ograniczone	zbędne
Dawka CaO ($t \cdot ha^{-1}$)	-	-	-	-	-

Źródło: opracowanie własne

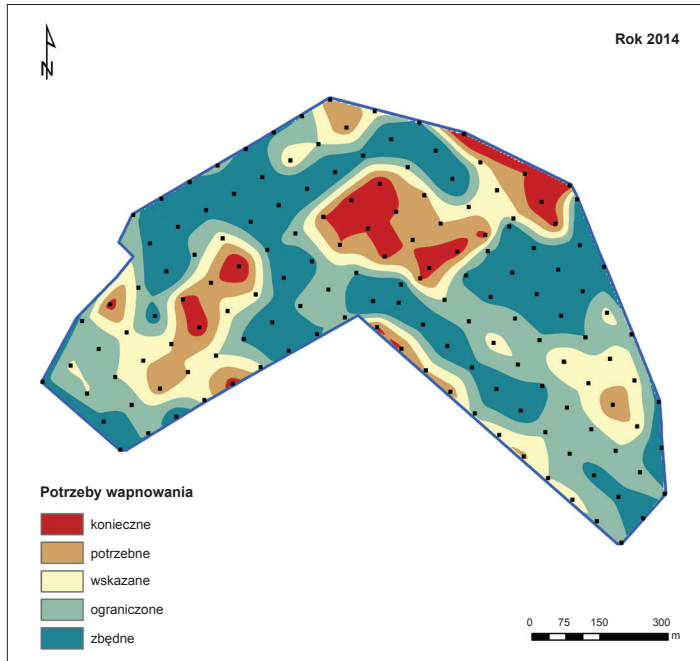
Analiza rzeczywistych potrzeb wapnowania w 154 punktach pomiarowych wykazała jednak ich przestrzenne zróżnicowanie (tab. 15). Suma zapotrzebowania na nawozy wapniowe, obliczona według dawek dla każdego punktu indywidualnie, waha się od 2,9 t w polu nr 4 do 21,3 t w polu nr 6. Łączne zużycie wapna na czterech polach płodozmiennych (nr 4-7) o łącznej powierzchni 79,8 ha wynosi 53 t i jest to rzeczywista ocena zapotrzebowania na nawozy wapniowe, która znacznie odbiega od oceny tradycyjnej, tzn. na podstawie średnich wartości odczynu.

Tabela 15

Liczba punktów pomiarowych oraz zużycie wapna w polach płodozmiennych

Potrzeby wapnowania	Numer i powierzchnia pola (ha)							
	4 (9,3)	5 (19,7)	6 (19,7)	7 (31,1)	4 (9,3)	5 (19,7)	6 (19,7)	7 (31,1)
	liczba punktów				zużycie wapna (t z pow. pola)			
Konieczne	-	4	5	1	-	6,22	8,81	1,81
Potrzebne	1	2	9	6	1,04	2,07	9,85	6,74
Wskazane	3	7	4	11	1,81	3,89	2,59	8,04
Ograniczone	6	2	7	17	-	-	-	-
Zbędne	8	23	13	25	-	-	-	-
Suma	18	38	38	60	2,85	12,2	21,3	16,6

Źródło: opracowanie własne



Rys. 3. Mapa potrzeb wapnowania

Źródło: opracowanie własne

Na rysunku 3 zobrazowano przestrzenne zróżnicowanie potrzeb wapnowania w obrębie pola.

Na podstawie danych o plonie ziarna pszenicy ozimej (tab. 13) i pobrania, uwzględniając zasobność gleb (tab. 16), w punktach pomiarowych siatki geostatystycznej wyznaczono dawki składników pokarmowych. Wartości średnie uwzględniono w obliczeniach według tradycyjnego systemu zaleceń nawozowych, wartości minimalne i maksymalne oraz współczynnik zmienności charakteryzują zakres zróżnicowania wartości rzeczywistych w punktach pomiarowych, które uwzględniono w obliczeniach dla potrzeb rolnictwa precyzyjnego (tab. 16-18).

Tabela 16

Charakterystyka statystyczna zróżnicowania pobrania makroelementów ($\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$)
przez pszenicę ozimą w punktach pomiarowych pól płodozmiennych

Nr pola (liczba punktów)	Charakterystyka	N	P_2O_5	K_2O	Mg
5 (38 punktów)	średnia	106,1	46,3	29,0	7,30
	minimum	51,5	22,5	14,1	3,54
	maksimum	142,0	61,9	38,8	9,77
	wsp. zmienności (%)	18,9	18,9	18,9	18,9
6 (38 punktów)	średnia	95,3	41,6	26,0	6,56
	minimum	52,6	22,9	14,4	3,62
	maksimum	151,2	65,9	41,28	10,4
	wsp. zmienności (%)	28,4	28,4	28,4	28,4
7 (60 punktów)	średnia	118,1	51,5	32,2	8,12
	minimum	83,5	36,4	22,8	5,74
	maksimum	142,4	62,1	38,9	9,79
	wsp. zmienności (%)	12,4	12,4	12,4	12,4
5-7 (136 punktów)	średnia	108,4	47,3	29,6	7,46
	minimum	51,5	22,5	14,1	3,54
	maksimum	151,2	65,9	41,3	10,4
	wsp. zmienności (%)	20,5	20,5	20,5	20,5

Źródło: opracowanie własne

Potrzeby nawożenia odpowiadające dawkom nawozów mineralnych przedstawiono w tabeli 17. W porównaniu do średniej dawki wyznaczonej w sposób tradycyjny, dawki azotu wyliczone w punktach pomiarowych dla potrzeb nawożenia precyzyjnego wahały się od 48 do 158%, dawki fosforu od 36 do 201%, dawki potasu od 52 do 183%, a magnezu od 44 do 206%.

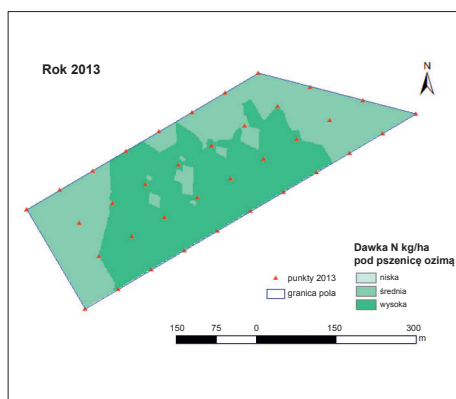
Tabela 17

Charakterystyka statystyczna zróżnicowania potrzeb nawożenia ($\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$)
pszenicy ozimej w punktach pomiarowych pól płodozmiennych

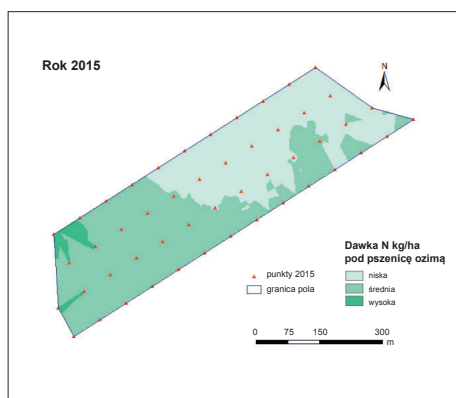
Nr pola (liczba punktów)	Charakterystyka	N	P_2O_5	K_2O	MgO
5 (38 punktów)	średnia	106,1	43,6	18,5	8,30
	minimum	51,5	18,6	11,7	4,82
	maksimum	142,0	72,2	31,3	15,76
	wsp. zmienności (%)	18,9	30,5	26,1	30,3
6 (38 punktów)	średnia	95,4	32,8	15,4	8,77
	minimum	52,6	16,7	9,55	4,89
	maksimum	151,2	63,0	28,2	16,6
	wsp. zmienności (%)	28,4	36,7	27,3	32,2
7 (60 punktów)	średnia	118,1	50,2	20,4	10,9
	minimum	83,5	18,2	11,4	4,78
	maksimum	142,4	87,3	32,1	19,8
	wsp. zmienności (%)	12,4	32,5	23,1	30,0
5-7 (136 punktów)	średnia	108,4	43,5	18,5	9,59
	minimum	51,5	16,7	9,55	4,78
	maksimum	151,2	87,3	32,1	19,8
	wsp. zmienności (%)	20,5	36,8	27,2	33,1

Źródło: opracowanie własne

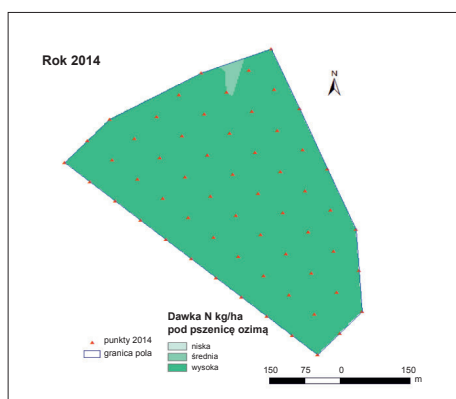
Dla poszczególnych pól płodozmiennych wykreślono odpowiednie mapy dawek (rys. 4-8). Na rysunku 4 przedstawiono strefy niskich, średnich i wysokich potrzeb nawożenia azotem, a na rysunku 5 przestrzenny rozkład dawek fosforu, potasu i magnezu w polach płodozmiennych pszenicy ozimej.



Pole nr 5

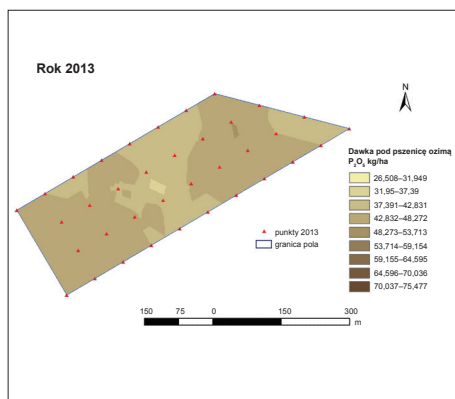


Pole nr 6

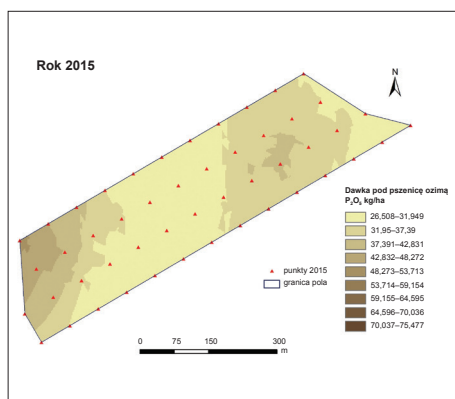


Pole nr 7

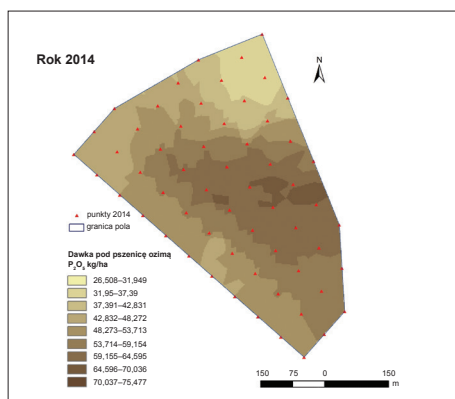
Rys. 4. Strefy niskich, średnich i wysokich dawek azotu (N) w polach płodozmiennych
Źródło: opracowanie własne

Dawki P_2O_5 

Pole nr 5

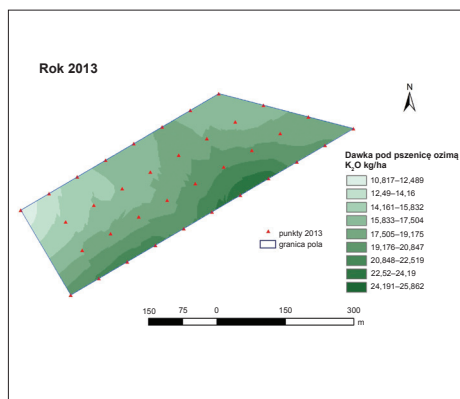


Pole nr 6

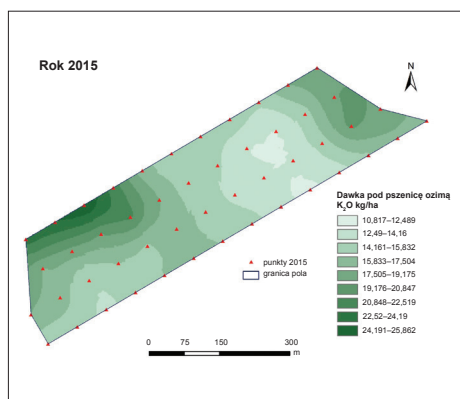


Pole nr 7

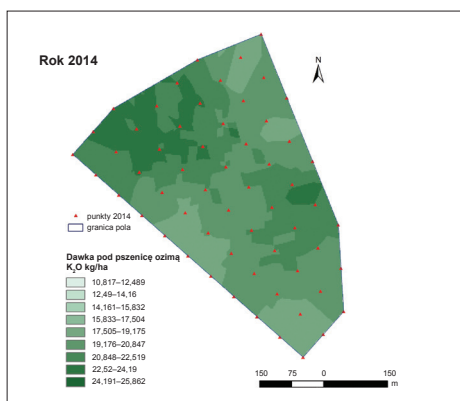
Rys. 5a. Mapy dawek makroelementów zalecanych pod pszenicę ozimą w polach płodozmiennych
Źródło: opracowanie własne

Dawki K_2O 

Pole nr 5



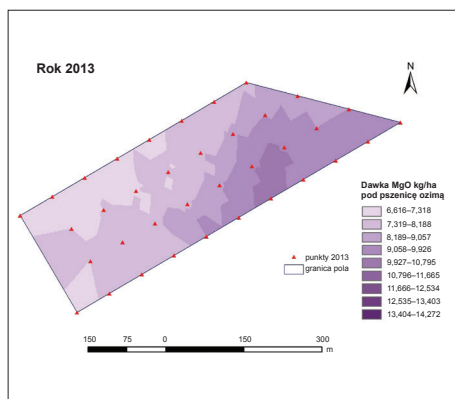
Pole nr 6



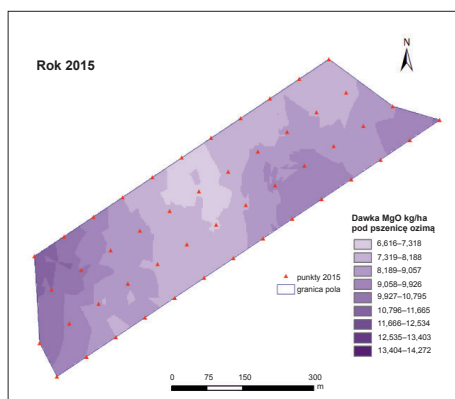
Pole nr 7

Rys. 5b. Mapy dawek makroelementów zalecanych pod pszenicę ozimą w polach płodozmiennych
Źródło: opracowanie własne

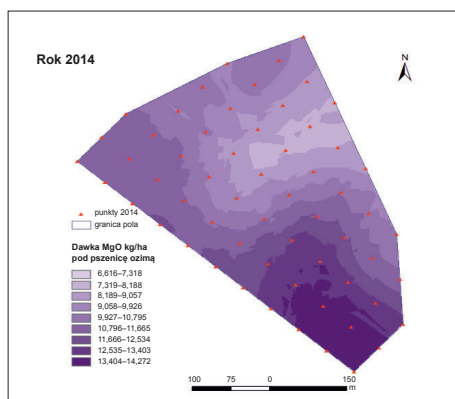
Dawki MgO



Pole nr 5



Pole nr 6



Pole nr 7

Rys. 5c. Mapy dawek makroelementów zalecanych pod pszenicę ozimą w polach płodozmiennych
Źródło: opracowanie własne

Różnice między dawką „precyzyjną” i „tradycyjną”

Dla każdego punktu pomiarowego określono różnice pomiędzy dawką składników obliczoną dla potrzeb rolnictwa precyzyjnego (w punktach pomiarowych) i według zaleceń tradycyjnych dla pszenicy ozimej na podstawie średniej dla pola. Wartości ujemne ($<-10\%$) oznaczają, że potrzeby nawozowe w danym punkcie pola są mniejsze niż wynikałoby to z zaleceń tradycyjnych, określanych średnio dla całego pola. Wskazują jednocześnie możliwości ograniczenia dawek i zużycia nawozów. W punktach tych zatem nawożenie precyzyjne, według danych rzeczywistych, jest bardziej korzystne niż tradycyjne (średnio dla pola). Wartości dodatnie ($>10\%$) wskazują, że potrzeby nawożenia wyliczone „precyzyjnie” są większe niż wyliczone „tradycyjnie”. Oznacza to, że w punktach tych potrzeby nawożenia są większe niż średnie dla całego pola i wskazują na potrzebę zwiększenia dawek odpowiednich składników i jednocześnie możliwość zwiększenia plonu końcowego. Jeśli dawki w poszczególnych punktach wyliczone dwoma sposobami nie różniły się o więcej niż 10% , uznano je za optymalne.

Tabela 18

Udział punktów pomiarowych według potrzeb nawożenia w stosunku do średniej z pola jak w zaleceniach tradycyjnych

Nr pola (liczba punktów)	Potrzeby nawożenia	N		P ₂ O ₅		K ₂ O		MgO	
		liczba	%	liczba	%	liczba	%	liczba	%
5 (38)	mniejsze	12	32	16	42	15	40	18	48
	równe	13	34	7	18	13	34	10	26
	większe	13	34	15	39	10	26	10	26
6 (38)	mniejsze	20	53	19	50	14	37	18	47
	równe	5	13	6	16	14	37	9	24
	większe	13	34	13	34	10	26	11	29
7 (60)	mniejsze	15	25	28	47	29	48	22	37
	równe	30	50	8	13	9	15	17	28
	większe	15	25	24	40	22	37	21	35
5-7 (136)	mniejsze	45	33	57	42	58	42	72	53
	równe	46	34	28	21	39	29	16	12
	większe	45	33	51	37	39	29	48	35

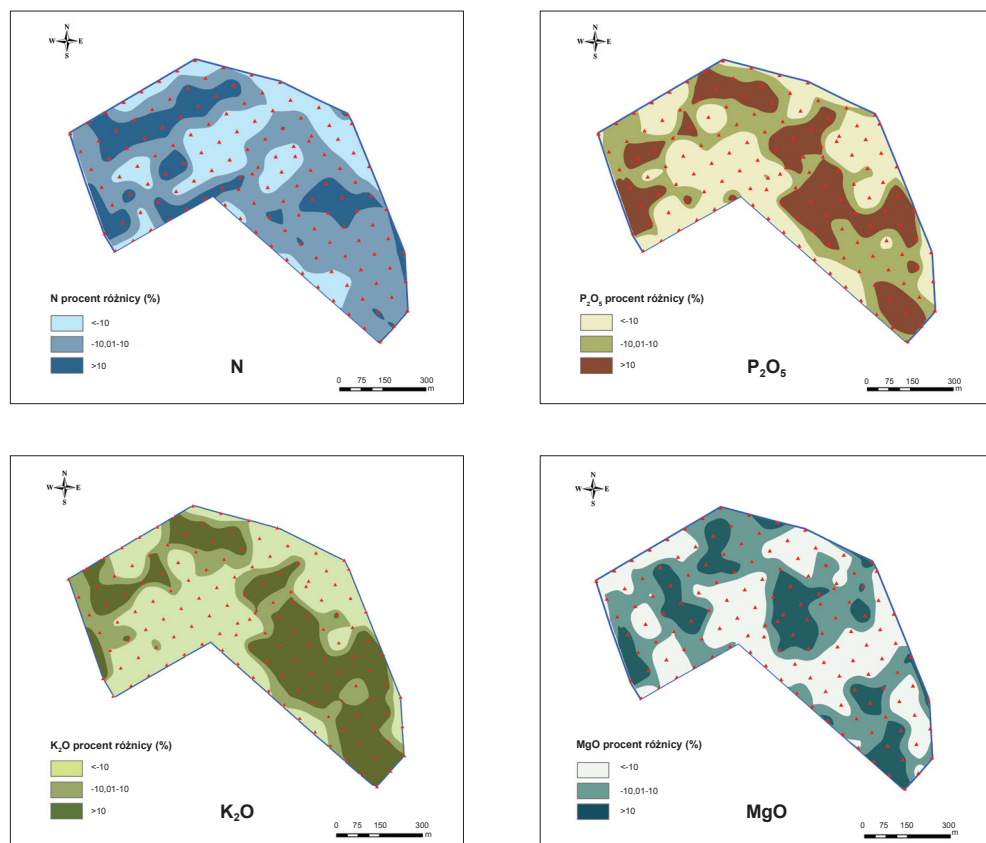
Źródło: opracowanie własne

Przy takich założeniach, nawożenie azotem – według oznaczeń zasobności gleby w punktach pomiarowych – pozwala na zmniejszenie dawek w porównaniu do zaleceń tradycyjnych w ponad połowie punktów pola nr 6, w 34% punktów, tzn. w nieco mniejszej liczbie punktów, wskazuje potrzebę zwiększenia dawek (ale umożliwia zwiększenie plonu) i w 13% nie różni się od tradycyjnego (tab. 18). W polu nr 7,

w 50% punktów potrzeby nawożenia azotem wyliczone w sposób precyzyjny i tradycyjny są jednakowe, w 25% punktów nawożenie precyzyjne umożliwia zmniejszenie dawki N i w takiej samej liczbie punktów (25%) wskazuje potrzebę zwiększenia dawki. W polu nr 5, a także średnio w trzech polach pszenicy, liczba punktów, w których dawka azotu w nawożeniu precyzyjnym jest mniejsza, większa i równa dawce w nawożeniu tradycyjnym, jest jednakowa.

Dawki fosforu, potasu i magnezu wyliczone dla potrzeb rolnictwa precyzyjnego są mniejsze w stosunku do rolnictwa tradycyjnego w większej ilości punktów niż dawki większe czy równe. Jedynie w polu nr 6 dawki potasu wyznaczone zgodnie z systemem precyzyjnym były mniejsze w stosunku do dawki tradycyjnej w takiej samej liczbie punktów, co równe.

Na rysunku 6 przedstawiono mapy różnic pomiędzy dawką składników obliczoną dla potrzeb rolnictwa precyzyjnego (w punktach pomiarowych) i według zaleceń tradycyjnych dla pszenicy ozimej na podstawie średniej dla pola.



Rys. 6. Mapy różnic pomiędzy dawką składników w rolnictwie precyzyjnym i tradycyjnym w polach pszenicy ozimej

Źródło: opracowanie własne

Zapotrzebowanie na nawozy

Czy zatem na analizowanym polu zastosowanie dawek wyznaczonych zgodnie z założeniami rolnictwa precyzyjnego przyniesie korzyści w zapotrzebowaniu na nawozy? Okazuje się, że tylko w przypadku nawozów fosforowych łączne zużycie nawozów w rolnictwie precyzyjnym będzie mniejsze niż w tradycyjnym (tab. 19). A zatem zróżnicowanie dawek nawozów w obrębie pola nie wpłynie na ograniczenie zużycia nawozów. Może jednak spowodować lepsze wyrównanie plonów roślin na skutek zrównoważonego nawożenia, zgodnie z potrzebami nawozowymi w każdym punkcie pola, co powinno przełożyć się na większe korzyści z uprawianej powierzchni.

Tabela 19

Zapotrzebowanie na nawozy w polach pszenicy ozimej

Nr pola (powierzchnia w ha)	Plon (t·ha ⁻¹)	System	Zużycie nawozów z pow. pola (kg)			
			N	P ₂ O ₅	K ₂ O	MgO
5 (19,7)	5,6	tradycyjny	2092	912	286	120
		precyzyjny	2091	934	552	151
6 (19,7)	5,04	tradycyjny	1877	818	256	108
		precyzyjny	1878	764	450	144
7 (31,1)	6,20	tradycyjny	3673	1602	1005	317
		precyzyjny	3673	1532	945	289
5-7 (70,5)	5,73	tradycyjny	7635	3328	1565	438
		precyzyjny	7642	3230	1947	583

Źródło: opracowanie własne

Podsumowanie

Na przykładzie pola doświadczalnego w SD w Baborówku porównano dawki nawozów wyliczone zgodnie z zaleceniami dla rolnictwa precyzyjnego oraz według dotychczas stosowanych zaleceń tradycyjnych. Pierwszy sposób zakłada różnicowanie dawek nawożenia z uwzględnieniem zmienności plonów i warunków glebowych, a drugi polega na stosowaniu jednakowej średniej dawki w obrębie całego pola. Wykazano, że przy obecnym stanie pola precyzyjne wyznaczanie dawek nawożenia umożliwia identyfikację obszarów, gdzie istnieją potencjalne możliwości zmniejszenia dotychczas stosowanych dawek nawozów oraz takich, gdzie w warunkach zwiększonych dawek nawożenia istnieje możliwość zwiększenia plonu. W przypadku nawożenia azotem, w ponad połowie punktów pomiarowych pola nr 6 i od 25% do 32% punktów pól nr 5 i 7 wykazano mniejsze potrzeby nawożenia azotem niż średnio z pola. W punktach tych nawożenie precyzyjne jest bardziej korzystne niż tradycyjne. Średnio na trzech polach pszenicy liczba punktów, w których precyzyjne nawożenie

azotem jest korzystne, niekorzystne i optymalne jest jednakowa. Precyzyjne nawożenie fosforem, potasem i magnezem jest korzystne (mniejsze dawki) w stosunku do tradycyjnego w większej ilości punktów niż niekorzystne (większe dawki) czy obojętne (jednakowe dawki). Jedynie w polu nr 6 precyzyjne nawożenie potasem jest korzystne (mniejsze dawki) w takiej samej liczbie punktów, co obojętne (jednakowe dawki).

Precyzyjne rozpoznanie warunków glebowych w obrębie pola umożliwia wskazanie obszarów wymagających wapnowania. W porównaniu do tradycyjnego sposobu wyznaczania dawek wapna, który nie wykazywał zapotrzebowania na nawozy wapniowe, ich zużycie w systemie precyzyjnym waha się – zależnie od pola – od 2,85 do 21,3 t. Precyzyjne nawożenie pozostałymi makroelementami, z wyjątkiem nawozów fosforowych, nie wpłynie na ograniczenie zużycia nawozów na całym polu. Może jednak spowodować lepsze wyrównanie plonów na skutek zrównoważonego nawożenia zgodnie z potrzebami nawozowymi w każdym punkcie pola, co powinno przełożyć się na większe korzyści z uprawianej powierzchni.

Literatura

1. J a d c z y s z y n T.: Bilans podstawą zrównoważonego zarządzania składnikami pokarmowymi. Dobre praktyki rolnicze w nawożeniu użytków rolnych. Centrum Doradztwa Rolniczego w Brwinowie, Oddział w Radomiu, 2013, 6-14.
2. J a d c z y s z y n T., K o w a l c z y k J., L i p i ń s k i W.: Zalecenia nawozowe dla roślin uprawy polowej i trwałych użytków zielonych. Instrukcja upowszechnieniowa, IUNG-PIB, Puławy, 2008, 151: 22-24.
3. J a d c z y s z y n T.: Sporządzanie planu nawożenia z uwzględnieniem wyników badań gleby. Raporty PIB, Puławy, 2006, 1: 37-43.
4. Materiały do opracowywania zaleceń nawozowych na gruntach ornych. PWRiL, Warszawa 1989, ss. 48.
5. Precision Agriculture – An opportunity for EU farmers – Potential support with the CAP 2014-2020, www.europarl.europa.eu, ss. 56.
6. Zalecenia nawozowe. Liczby graniczne do wyceny zawartości w glebach makro- i mikroelementów. Wyd. II, Seria P(44), cz. I, IUNG Puławy, 1990, 18-37.

Adres do korespondencji:

prof. dr hab. Alicja Pecio
Zakład Żywienia Roślin i Nawożenia
IUNG-PIB
ul. Czartoryskich 8
24-100 Puławy
tel. 81 47 86 834
e-mail: Alicja.Pecio@iung.pulawy.pl

Anna Podleśna

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

CZYNNIKI KSZTAŁTUJĄCE WYMYWANIE JONÓW SIARCZANOWYCH Z GLEB UPRAWNYCH

Słowa kluczowe: siarka siarczanowa, adsorpcja, wymywanie, nawożenie, przesączka, gleby

Wstęp

Siarka należy do składników niezbędnych dla roślin, ponieważ bierze udział w ich najważniejszych procesach życiowych, przez co decyduje o wielkości i jakości plonu (13). Źródłem siarki w glebie są glebowa materia organiczna, minerały glebowe, nawozy naturalne i mineralne, związki gazowe z atmosfery oraz środki ochrony roślin (5, 20).

Siarka jest obecna w glebie w formie nieorganicznej i organicznej. Jednak w większości gleb użytkowanych rolniczo ponad 90% całkowitej zawartości siarki stanowi jej forma organiczna (5), która funkcjonuje jako siarka połączona z węglem (sulfoniany, siarka aminokwasowa) lub jako estry siarkowe i jest bezpośrednio niedostępna dla roślin (4, 12). Mniejszy udział w całkowitej puli siarki w glebie ma siarka siarczanowa (<10% siarki całkowitej), jednakże z żywieniowego punktu widzenia forma ta ma największe znaczenie dla roślin, ponieważ może być przez nie łatwo pobierana. Głównym źródłem siarczanów, z których rośliny mogą bezpośrednio korzystać, są nawozy mineralne. Drugim dostarczycielem siarczanów jest materia organiczna, która podlega zachodzącym jednocześnie w glebie procesom mineralizacji (udostępniania siarczanów) i immobilizacji (włączenia w formy niedostępne). O tym, który z wymienionych procesów dominuje w glebie i czy w efekcie nastąpi włączenie siarczanów w substancję organiczną, czy też jej mineralizacja (i prawdopodobne wymycie siarczanów) decydują właściwości fizykochemiczne gleby (13).

* Opracowanie wykonano w ramach zadania 1.6 w programie wieloletnim IUNG-PIB.

Siarczany obecne w glebie i dostające się do gleb obszarów rolniczych mogą być:

- 1) adsorbowane na koloidach glebowych,
- 2) redukowane i gromadzone w masie roślinnej lub w glebowej biomasie mikrobiologicznej, a następnie uwalniane do atmosfery w formie H_2S (jako siarczki słabo rozpuszczalne w glebie),
- 3) pobierane przez rośliny,
- 4) wymywane w głąb profilu glebowego (3, 13).

Wymywanie zachodzi podczas pionowego ruchu zstępującego wody, kiedy to składniki pokarmowe przemieszczają się przez warstwy gleby. To sprawia, że wymywanie jonów siarczanowych ($S-SO_4^{2-}$) ze strefy korzeniowej jest jednym z podstawowych procesów oddziałujących na dostępność siarki glebowej dla roślin (20). Oznacza to, że intensyfikacja tego procesu w okresach dużego zapotrzebowania roślin na siarkę może skutkować jej deficytem, znajdującym odbicie w wielkości i jakości uzyskanych plonów. Obawy te potwierdzają badania prowadzone w ramach „Monitoringu chemizmu gleb ornych Polski” (23). Wykazały one, że 94% próbek gleb zostało zakwalifikowanych do niskiej zawartości siarki siarczanowej, co wiąże się z możliwością wystąpienia niedoborów siarki w tych glebach.

Niniejsza praca ma charakter przeglądowy i jest oparta o wyniki badań prowadzonych zarówno w Polsce, jak i za granicą. Jej celem jest przedstawienie problemu strat siarki siarczanowej z gleb uprawnych przez omówienie procesów wpływających na zatrzymywanie siarczanów w glebach i powodujących ich straty w wyniku wymywania oraz czynników decydujących o ich wykorzystaniu przez rośliny uprawne.

Wpływ chemicznych i fizycznych czynników gleby na przemieszczanie się jonów SO_4^{2-} w profilu glebowym

Na ruch jonu SO_4^{2-} w glebie mają wpływ zarówno fizyczne, jak i chemiczne właściwości gleby. Właściwości fizyczne determinują wielkość i rozkład ruchu wody oraz dyfuzję jonów. Natomiast właściwości chemiczne wpływają na wymianę jonów i ich reakcję ze składnikami gleby. Jednakże ostateczną dystrybucję jonów $S-SO_4^{2-}$ określa układ kombinacji tych właściwości (25). Liczne prace potwierdzają, że fizyczne właściwości fazy stałej gleby (tj. rozkład wielkości porów i specyficzna powierzchnia) oddziałują na transport cieczy poprzez wpływ na zmiany gradientu, kanałowość, szybkość dyfuzji i wilgotność. Duży wpływ na ruch jonów ma struktura gleby, czyli przestrzenny układ cząstek glebowych (25).

Ważnym podkreślenia jest fakt, iż wielkość ruchu jonów SO_4^{2-} w glebie jest zmniejszana przez reakcje adsorpcji. Większość gleb posiada pewną zdolność adsorpcji tych jonów, aczkolwiek gleby różnią się znacznie w tym względzie. Proces adsorpcji siarczanów jest łatwo odwracalny i zależny od wielu właściwości gleby, do których należy zaliczyć (1, 5, 20, 25):

- zawartość gliny i typ minerału gliniastego – adsorpcja SO_4^{2-} zwykle wzrasta wraz ze wzrostem zawartości gliny w glebie,

- wodorotlenki Al i Fe – odpowiedzialne za większość adsorpcji SO_4^{2-} w glebach,
- poziom gleby i głębokość – ilość SO_4^{2-} w powierzchniowej warstwie gleby różni się od jej zawartości w głębszych poziomach,
- wpływ pH – adsorpcja SO_4^{2-} jest faworyzowana przez silnie kwaśne warunki w glebie, a staje się nieistotna, gdy odczyn gleby ma wartość >6 ,
- węgiel organiczny,
- wpływ czasu – retencja siarczanów wzrasta wraz z długością czasu, w którym mają one kontakt z substancją adsorbującą, czyli cząstkami gleby,
- obecność innych anionów – fosforany zmniejszają adsorpcję jonów SO_4^{2-} ,
- wpływ kationów – retencja siarczanów jest zależna od towarzyszącego kationu.

Wymywanie jonu SO_4^{2-} z gleby

Jon siarczanowy (SO_4^{2-}) ma ujemny ładunek, przez co może ulegać przemieszczaniu wraz z wodą glebową i bywa łatwo wymywany z gleby, szczególnie w warunkach dużych opadów (5). Najważniejszymi charakterystykami gleby wpływającymi na procesy wymywania i magazynowania siarczanów są jej właściwości hydrauliczne oraz adsorpcja jonu. Podatność gleb na wymywanie siarczanów jest zależna od ich zdolności do zatrzymywania tych jonów. Jednakże jeśli nawet jon SO_4^{2-} jest zaadsorbowany przez glebę, to jest słabo przez nią utrzymywany i może być usunięty w wyniku powtórnej ekstrakcji wodą. Zatem czynnik ten wpływa na los glebowych jonów S-SO_4^{2-} oraz, w konsekwencji, na możliwości zaopatrzenia roślin w ten składnik (20).

Jak już wspomniano, najważniejszą nieorganiczną formą siarki w glebach są siarczany, jako forma bezpośrednio dostępna dla roślin. Wzajemne oddziaływanie siarczanów z fazą stałą gleby wpływa na ich mobilność oraz dostępność dla roślin (1), ponieważ ruch siarczanów z wodą jest głównym mechanizmem, dzięki któremu jon SO_4^{2-} jest dostarczany do korzeni roślin (25). Transport siarczanów w profilu glebowym jest zależny od ich koncentracji w roztworze glebowym i reakcji ze składnikami fazy stałej gleby, a także szybkości i rozkładu ruchu wody w profilu glebowym. Zależności pomiędzy tymi czynnikami determinują fizykochemiczny los jonów SO_4^{2-} , uwalnianych w procesie mineralizacji siarki organicznej lub tych, które dostały się do gleby w nawozach, resztkach roślinnych, wodach nawadniających i w wyniku depozycji atmosferycznej.

Proces wymywania zależy od wielu czynników fizycznych i chemicznych. Występuje on zawsze, kiedy faza ciekła przenika materiał stały lub jest z nim w kontakcie, a są w niej rozpuszczone substancje organiczne czy nieorganiczne. Do najważniejszych czynników fizycznych należą: rozmiar, kształt i porowatość cząstek glebowych, jednorodność faz mineralnych, temperatura, przedział czasu, szybkość przepływu lub ilość przesączy i stopień saturacji oraz rozkład cykli sucha : mokro (19). Z kolei najważniejsze aspekty chemiczne są związane z odczynem i warunkami redoks, dostępnością jonów do wymywania, procesami tworzenia związków kompleksowych i sorpcji.

Wpływ użytkowania gleby na stężenie siarczanów w przesączach

Analizując trzy cykle płodozmianowe w wieloletnim doświadczeniu lizymetrycznym, zlokalizowanym w IUNG w Puławach, stwierdzono, że średnie miesięczne stężenie siarczanów w przesączach gleb pozostawionych w ugorze było mniejsze niż z gleb obsiewanych (24) (tab. 1). W przesączach zebranych z gleby piaskowej i gliniastej stężenie tego anionu utrzymywało się na podobnym poziomie, a najwyższą jego koncentrację notowano w styczniu i lutym. Stężenie siarczanów w przesączach z gleby lessowej osiągnęło maksimum w lutym i czerwcu, przy czym było ono wyższe niż w przesączach uzyskanych z gleby gliniastej i piaskowej. Jednocześnie stwierdzono dużą rozpiętość stężeń siarki siarczanowej zarówno w poszczególnych latach, jak też między porównywanymi glebami i obiektami nawozowymi. Najwyższym średnim stężeniem siarki siarczanowej charakteryzowała się gleba piaskowa przy zakresie stężeń od 15,4 do 131,2 mg S-SO₄²⁻·dm⁻³.

Tabela 1

Średnie stężenia siarczanów w przesączach glebowych przy stosowaniu
średniego poziomu nawożenia NPK + Ca (mg S-SO₄²⁻·dm⁻³)

Obiekt	Lata badań							
	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	średnia
Gleba gliniasta								
Gleba obsiewana	71,3	31,7	71,1	44,0	44,7	69,8	62,2	56,4
Ugór	9,5	22,7	20,1	17,5	25,5	23,4	27,2	20,8
Gleba lessowa								
Gleba obsiewana	38,4	-	-	-	65,9	73,6	-	20,4
Ugór	20,1	22,4	27,4	23,0	36,7	33,5	34,2	28,2
Gleba piaskowa								
Gleba obsiewana	15,4	126,3	131,2	37,7	71,7	65,4	85,4	76,2
Ugór	10,2	22,5	20,7	13,7	29,5	21,2	20,4	19,7

* brak przesączy

Źródło: Sykut, 1993 (24), zmodyfikowane

Niższe średnie stężenia siarczanów oznaczono w przesączach zebranych z gleby gliniastej, przy ich rozpiętości od 31,7 do 71,3 mg S-SO₄²⁻·dm⁻³, a najniższe w przesączach z gleby lessowej (zakres od 38,4 do 73,6 mg S-SO₄²⁻·dm⁻³). Badania prowadzone przez Ercoli i in. (3) również wykazały, że zawartość siarki w wodach glebowych zależała od typu gleby uprawnej. Jednakże koncentracja siarki w wodach uzyskanych z gleby o składzie iłu gliniastego była zawsze wyższa niż w wodzie z gleby o składzie piasku gliniastego, a różnice te zmniejszały się wraz z postępem cyku rozwojowego pszenicy.

Wielkość średnio rocznego wymycia jonów siarczanowych, uzyskanego w doświadczeniu lizymetrycznym przez Sykutą (24), wskazuje, że istnieją bardzo duże różnice zarówno pomiędzy latami, jak i glebami (tab. 2). Jest to wynikiem znacznego zróżnicowania w ilości opadów występujących poszczególnych latach badań oraz ilości przesączy zebranych z badanych gleb. Jak wynika z tych badań (24), najwięcej przesączy w stosunku do ilości opadów obserwowano na poletkach z glebą gliniastą (16,4% wody opadowej), mniej z glebą piaskową (12,4%), a najmniej w przypadku gleby lessowej (5,4%). Natomiast największe straty siarki stwierdzono w warunkach gleb ugorowanych: średnio 4,8 g z lizymetru (1 m²) z glebą gliniastą oraz 3,5 i 4,5 g z lizymetrów wypełnionych odpowiednio glebą lessową i piaskową. W warunkach glebowo-klimatycznych Litwy, aż do 80% siarki zawartej w glebie jest wymywane w czasie ciepłego okresu wegetacji (15).

Tabela 2

Średnie wymycie siarczanów z gleb przy stosowaniu nawożenia
NPK II + Ca (g S-SO₄²⁻·m⁻²)

Obiekt	Lata badań							
	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	średnia
Gleba gliniasta								
Gleba uprawiana	4,5	0,9	2,0	2,5	7,2	8,4	1,5	3,9
Ugór	3,1	6,0	4,0	4,8	4,8	7,3	3,6	4,8
Gleba lessowa								
Gleba uprawiana	1,6	-*	-	-	1,2	2,3	-	0,7
Ugór	3,6	3,4	2,7	2,8	3,6	6,4	2,2	3,5
Gleba piaskowa								
Gleba uprawiana	2,1	0,5	0,6	1,3	7,3	7,1	0,7	3,1
Ugór	3,4	5,7	4,2	3,2	5,5	6,3	3,2	4,5

* brak przesączy

Źródło: Sykut, 1993 (24), zmodyfikowane

Wpływ nawożenia NPK i wapnowania na wymywanie jonów SO₄²⁻ z gleb uprawnych

Podstawowym warunkiem efektywnego działania nawozów mineralnych jest uregulowanie odczynu gleby, uzyskane najczęściej w efekcie wcześniejszego zastosowania nawozów wapniowych. Jak wykazano, zabieg wapnowania powoduje zwiększone pobieranie i wykorzystanie przez rośliny większości składników podanych w nawozach (6). W przypadku nawozów siarkowych, większe pobranie siarczanów przez rośliny może oznaczać mniejsze ich straty w wyniku wymycia do wód

glebowych. Z badań prowadzonych przez Ruszkowską i in. (22), wynika, że w przypadku niskiego poziomu nawożenia NPK (140-170-180 kg NPK·ha⁻¹, średnio na zmianowanie, odpowiednio dla gleby piaskowej, lessowej i gliniastej), połączonego z wapnowaniem, wymycie siarki siarczanowej jest nieznacznie wyższe w porównaniu do obiektów bez Ca, ale bilans siarki pozostaje dodatni (tab. 3). Natomiast w warunkach wyższych dawek nawożenia obserwowano nieco mniejsze straty siarczanów. Także Gondek (9) stwierdza, że wymyciu siarki z użytków zielonych sprzyjało stosowanie wapnowania przy nawożeniu mineralnym. Zwiększenie wartości pH gleby powoduje uwolnienie zaadsorbowanych siarczanów i udostępnienie ich roślinom, ale niestety także zwiększenie ich wymycia. Wapnowanie powoduje również zmiany aktywności mikrobiologicznej gleby, co oznacza zwiększenie mineralizacji materii organicznej i uwolnienie większej ilości związków siarki rozpuszczonych w roztworze glebowym. Kopáček i in. (13) podają, że mineralizacja siarki organicznej gleby waha się od 0,5 do 3,0% jej zasobów glebowych i intensyfikuje się po osuszeniu lub uprawie gleby. Dlatego przy modelowaniu długofalowych trendów w wymywaniu siarczanów z obszarów użytkowanych rolniczo nie powinny być pomijane takie czynniki, jak: wapnowanie, zmiany pH gleby, drenaż czy uprawa.

Tabela 3

Wpływ poziomu nawożenia NPK oraz wapnowania na bilans siarki (g/1m²)

Wyszczególnienie	Obiekt nawozowy			
	NPK I	NPK I + Ca	NPK II	NPK II + Ca
Przychód w nawozach	12,04	12,04	12,04	12,04
Przychód z opadami	4,63	4,63	4,63	4,63
Pobranie przez rośliny	4,15	4,22	4,86	5,16
Wymycie	11,47	12,10	14,03	13,87
Różnica bilansowa	+1,05	+0,35	-2,22	-2,36

Źródło: Ruszkowska i in., 1984 (22), zmodyfikowane

W badaniach prowadzonych przez Mašauskiene i Mašauskas (15), średnia zawartość siarczanów w wodach lizymetrycznych zebranych z poletek kontrolnych (bez nawożenia) na głębokości 40 cm mieściła się w przedziale 39-53 mg·l⁻¹, a w wodach z poletek nawożonych NPK od 115 do 224 mg·l⁻¹ (tab. 4). Stosowane nawożenie miało zdecydowany wpływ na zawartość siarczanów w przesączach lizymetrycznych w latach badań. Najniższe stężenia siarczanów stwierdzano w obiektach kontrolnych i nawożonych NK, z pominięciem fosforu, zaś najwyższe wartości tych stężeń były oznaczane w obiektach nawożonych fosforem, bez względu na to, czy stosowano również azot i/lub potas. Jak podaje Jaguś (11),

wyniki licznych badań nad składem chemicznym wód odpływających z profili glebowych w zróżnicowanych warunkach nawozowych wskazują, że nawożenie intensyfikuje wymywanie siarczanów. W pierwszej kolejności należy to przypisywać znacznemu wzbogaceniu gleby w siarkę, której zawartość w wielu nawozach mineralnych sięga kilkunastu procent (np. superfosfat prosty – 10-14, siarczan potasu – 18% S). Zdarza się jednak, że wzrastająca zawartość siarczanów występuje także wtedy, gdy siarka nie jest jednym z komponentów nawozowych. Można to wiązać z oddziaływaniem wprowadzonego fosforu mineralnego, bowiem jony fosforanowe nie tylko ograniczają wiązanie jonów siarczanowych w kompleksie sorpcyjnym, ale mogą je także z niego wypierać (14). Również Fageria (5) zwraca uwagę na fakt, iż fosforany wypierają jony SO_4^{2-} lub zmniejszają ich adsorpcję w glebie. Z kolei Friesen (8) wykazał, że fosforany są bardzo silnymi konkurentami siarczanów na powierzchni koloidów glebowych.

Tabela 4

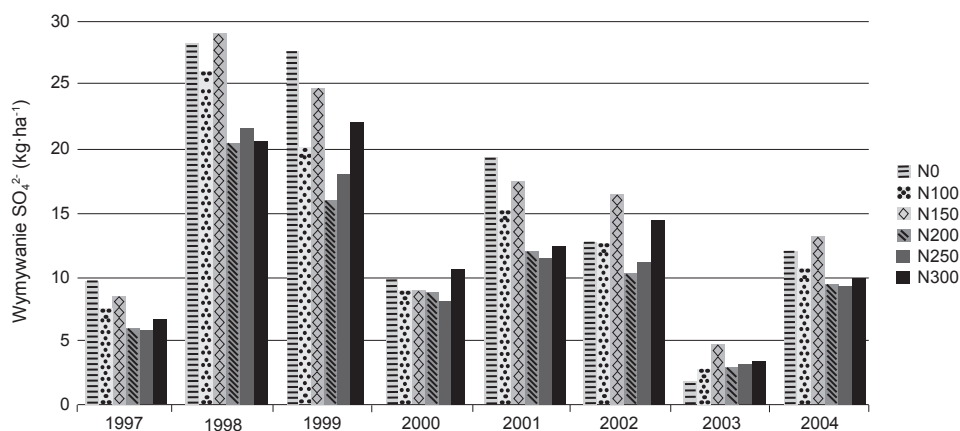
Wpływ nawożenia mineralnego na zawartość siarczanów w wodach lizymetrycznych

Dawka składnika ($\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$)			mg $\text{S-SO}_4^{2-} \cdot \text{l}^{-1}$ przesączu		
N	P_2O_5	K_2O	1976-1985	1976-1995	1976-2005
Głębokość 40 cm					
0	0	0	53±30	39±25	39±20
0	96	96	199±120	128±94	134±90
114	0	96	52±29	44±24	33±16
114	96	0	252±88	167±110	176±103
114	96	96	128±76	115±62	129±67
0	192	192	213±106	202±100	232±125
228	0	192	53±29	36±23	34±16
228	192	0	194±131	198±118	235±110
228	192	192	224±151	212±118	222±115
Głębokość 80 cm					
0	0	0	67±28	45±27	43±19
114	96	96	127±64	115±52	130±64
0	192	192	300±131	293±118	291±117
228	192	192	178±81	218±100	223±102

Źródło: Mašauskiene i Mašauskas, 2012 (15), zmodyfikowane

Wpływ zróżnicowanych dawek N na proces wymywania siarczanów w latach 1997-2004 badali Mesić i in. (17), którzy stwierdzili, że średnie wymycie wynosiło od 10 do 15 $\text{kg S-SO}_4^{2-} \cdot \text{ha}^{-1}$. Najniższe ilości wymywanej siarki były

obserwowane w obiektach nawożonych dawką 200-250 kg N·ha⁻¹, a najwyższe przy braku lub w warunkach stosowania niższego lub wyższego nawożenia N (rys. 1). Wymycie siarczanów w warunkach Chorwacji było także ściśle związane z ilością wody przepływającej przez profil glebowy, czyli ilością tzw. przesączy, co potwierdzają również badania Podleśnej (18) w odniesieniu do wymycia azotanów.



Rys. 1. Wymywanie S-SO₄²⁻ z wodą drenarską w zależności od dawki azotu i roku badań

Źródło: Mesić i in., 2007 (17), zmodyfikowane

Wpływ typu nawozu siarkowego na wymywanie siarczanów

Głównym czynnikiem prowadzącym do strat siarki jest w warunkach glebowych Litwy wymywanie (15), którego wielkość kształtuje się w przedziale od 33,1 do 202,9 kg S·ha⁻¹ i zależy od sposobu oraz wielkości nawożenia, warunków pogodowych, a także typu gospodarowania. Badania prowadzone przez Mašauskienę i Mašauską (15) wykazały, że silne wymywanie siarki było związane ze stosowaniem superfosfatu prostego i wynikającej z tego dawki siarki. Znacznie mniejsze straty siarczanów obserwowano w obiektach nawożonych gipsem. Wymywanie siarki z gipsu i superfosfatu było także przedmiotem wcześniejszych badań prowadzonych przez Coopera i Hogga (2). W ciągu 6 tygodni trwania eksperymentu obserwowali wymywanie siarki, co pozwoliło na stwierdzenie, iż straty były niezależne od rozmiaru cząstki gipsu, z wyjątkiem wymywania w czasie 1. tygodnia (tab. 5). Uzyskane wyniki wskazują, że wymywanie siarki z grubo zmielonego gipsu (frakcja liczby oczek siatki 16-30) wzrasta do 3. tygodnia od momentu zastosowania, po czym stopniowo maleje, pozostając do końca trwania eksperymentu na dość wysokim poziomie. Natomiast drobniejsze zmielenie gipsu (frakcja liczby oczek siatki 30-60 i 60-120) powoduje, że największe wymycie siarczanów ma miejsce już w 1. tygodniu doświadczenia, a w następnych tygodniach obserwuje

się stopniowe zmniejszenie ilości wymywanego składnika. Jednakże, niezależnie od wielkości cząstek gipsu, w ciągu 6 tygodni następuje wymycie siarki w zakresie 94-102% zastosowanej dawki. Zastosowanie superfosfatu także skutkowało wymyciem siarki, w efekcie czego jej ilość pozostała w glebie po zakończeniu doświadczenia, była niewielka bez względu na zastosowaną dawkę. Ponieważ siarka obecna w gruboziarnistej frakcji gipsu dostępnego na rynku była znacznie wolniej wymywana niż z jego drobnych frakcji i superfosfatu, to powstała sugestia, że cząstki gipsu o względnie większych rozmiarach mogą być bardziej efektywne w ograniczaniu szybkiego wymywania siarki z gleb.

Tabela 5

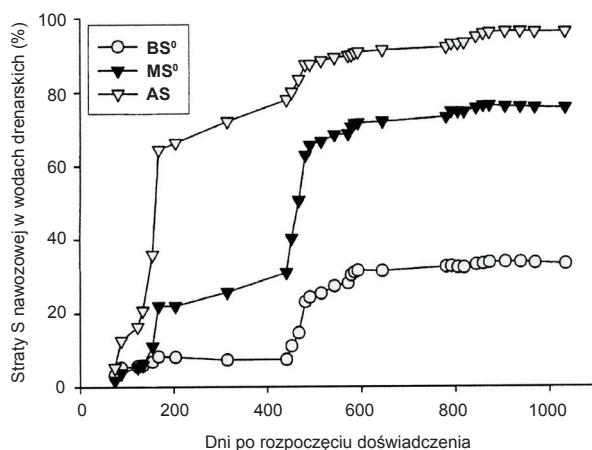
Dynamika wymywania siarki z gipsu o zróżnicowanym rozdrobnieniu (mg)

Dawka S na 0,4 ha	Frakcja oczka	Tydzień						Razem	% wymycia
		1	2	3	4	5	6		
5,1 mg	16-30	0,63	1,02	1,46	0,87	0,48	0,32	4,78	94
	30-60	1,73	0,98	0,97	0,73	0,42	0,29	5,12	100
	60-120	2,75	0,99	0,68	0,45	0,26	0,08	5,21	102
20,4 mg	16-30	2,23	4,92	5,20	3,45	2,00	1,78	19,58	96
	30-60	5,00	5,31	4,47	2,93	1,40	1,06	20,17	99
	60-120	5,85	5,30	3,82	2,40	1,10	1,10	19,57	96

Źródło: Cooper i Hogg, 1965 (2), zmodyfikowane

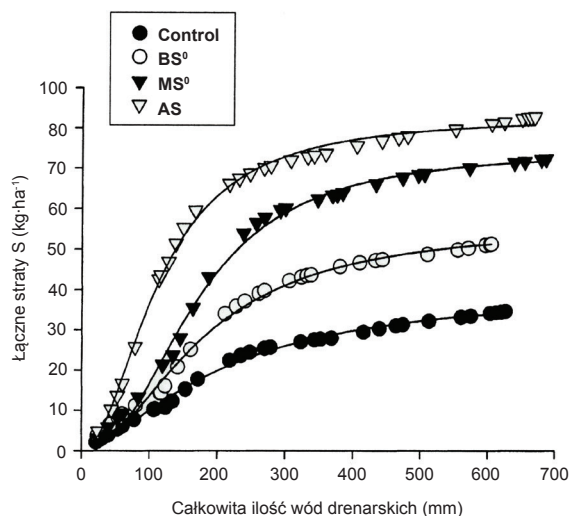
Z kolei Riley i in. (20) prowadzili badania lizymetryczne, w których uprawiali trawy, stosując siarkę w dawce $50 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$. W trakcie trzech lat trwania eksperymentu wystąpiły znaczne różnice w ilości opadów (474-758 mm), jednak nie miało to wpływu na sumę mokrej i suchej depozycji atmosferycznej siarki, która była bardzo zbliżona (6,7-7,8 $\text{kg S} \cdot \text{ha}^{-1}$). Autorzy stosowali trzy różne nawozy zawierające siarkę i obserwowali straty tego składnika (rys. 2). Po zakończeniu badań stwierdzili, że najwięcej siarki ulegało wymyciu w obiektach, w których stosowano siarczan amonu (AS), mniej gdzie podano rozdrobnioną siarkę elementarną (MS^0), a najmniej w przypadku użycia mieszanki 90% siarki elementarnej i 10% gliny bentonitowej (BS^0). Straty te wynosiły odpowiednio: 83,2, 72,8 i 51,5 $\text{kg S} \cdot \text{ha}^{-1}$, przy 34,9 $\text{kg S} \cdot \text{ha}^{-1}$ ulegającej wymyciu w obiektach kontrolnych. Należy dodać, iż siarka podana w formie siarczanu amonu ulegała stratom do wód w sposób bardziej gwałtowny niż z dwu pozostałych nawozów zawierających siarkę elementarną (rys. 2). W pierwszym roku badań stwierdzono, że straty siarki z podanej dawki wynoszą: 17, 26 i 72%, odpowiednio dla nawozów BS^0 , MS^0 i AS. Natomiast pod koniec trzeciego roku trwania doświadczenia łączne straty siarki w efekcie wymycia z poszczególnych nawozów wyniosły: 33, 75 i 96% siarki podanej odpowiednio w formie BS^0 , MS^0 i AS. Korzystając z odpowiedniego równania, autorzy obliczyli także zależność pomiędzy łącznymi stratami S a całkowitą

ilością przesączy. Na tej podstawie stwierdzili, że w przypadku siarczanu amonu ponad 90% strat siarki wystąpiło w czasie pierwszych 200 mm wód przenikających przez glebę po aplikacji tego nawozu (rys. 3). Według Coopera i Hogg (2) siarka w formie elementarnej wymaga od 6 miesięcy do około roku zanim zacznie w pełni reagować w glebie, dlatego nie ulega tak szybkiemu wymyciu. Friesen (8) stwierdził, że stratom ulegało aż do 50% siarki zastosowanej w formie siarczanów, podczas gdy straty siarki podanej w formie elementarnej wynosiły <20% jej dawki.



Rys. 2. Łączne straty S do wód drenarskich w zależności od formy nawozu

Źródło: Riley i in., 2002 (20), zmodyfikowane



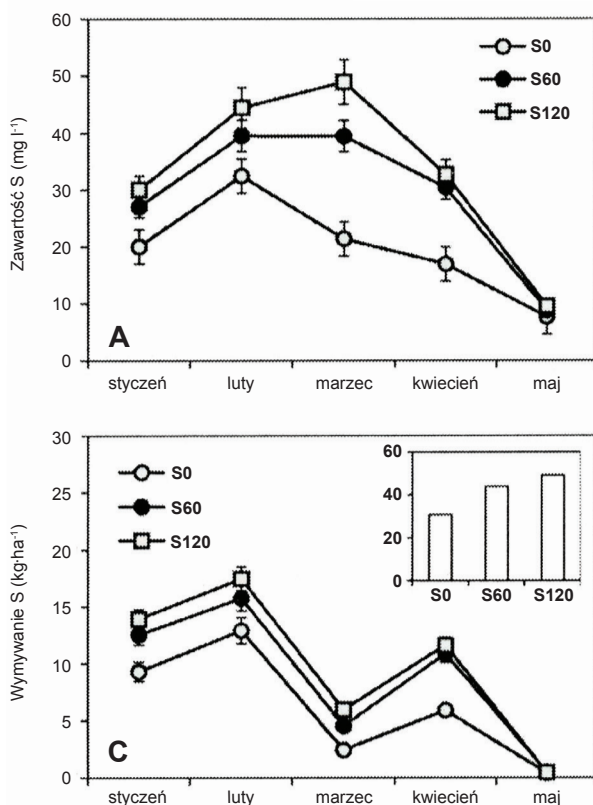
Rys. 3. Łączne straty S w zależności od nawozu i ilości wód drenarskich

Źródło: Riley i in., 2002 (20), zmodyfikowane

Zdaniem Filipek-Mazur (7), spośród soli stosowanych do nawożenia najłatwiej wymywany jest jon siarczanowy (VI), znajdujący się w siarczanach sodu, potasu i magnezu, a w najmniejszym stopniu jest on wymywany z siarczanu wapnia.

Wymywanie siarki w zależności od jej dawki i sposobu stosowania

Ercoli i in. (3) stwierdzili, że zarówno zawartość siarki w przesiąkających wodach, jak i jej straty w wyniku wymycia, były zależne tylko od nawożenia tym składnikiem. Wymywanie siarki trwało aż do kwietnia, a jej straty wzrastały wraz ze wzrostem dawek nawożenia (rys. 4). Natomiast w maju wartości wymycia były niskie i niezależne od nawożenia siarką. Wymienieni autorzy stwierdzili ponadto, że o koncentracji siarki w wodach przesiąkowych decyduje również sposób podziału dawek nawozów siarkowych. Wykazali oni, że zmniejszenie wysokości dawki nawozu siarkowego aplikowanego przedsięwzięnie obniżało o 15-37% zawartość S w wodach zebranych w okresie styczeń – marzec.



Rys. 4. Zawartość siarki w wodach drenarskich (A) oraz jej wymywanie (C) w zależności od dawki siarki w nawożeniu

Źródło: Ercoli i in., 2012 (3), zmodyfikowane

Także w badaniach prowadzonych przez *Coopera i Hogg*a (2) straty siarki były proporcjonalne do zastosowanych dawek (tab. 5). Uzyskane wyniki wskazują zatem, że aplikacja superfosfatu w dawkach podzielonych (jesienią i wiosną) powinna utrzymać poziom siarki bardziej równomiernie w ciągu roku niż zastosowanie takiej samej ilości w jednej dawce. Również *Friesen* (8) uważa, że niedobory siarki mogą być korygowane przez stosowanie formy siarczanowej nawozów, ale powinny one być podawane w bardziej odpowiednich (tj. niższych) dawkach.

Wpływ roślin w zmianowaniu na wymywanie siarki nawozowej z gleby

Mašauskiene i Mašauskas (15) uważają, że znacznie więcej siarki jest wymywane z gleby, jeśli zmianowanie roślin jest ekstensywne, to znaczy gdy uprawia się gatunki mniej wymagające tego składnika (niektóre zboża, rośliny pastewne). Średnie ilości jonu SO_4^{2-} wymywanego z wodą drenarską, w czasie 5 lat badań, wynosiły $554 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ na sezon w systemie zmianowania organicznego (ze stosowaniem obornika), a $349 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ w systemie intensywnym. Analizy korelacji wykazują zależność wymywania składników pokarmowych od plonu roślin, z tendencją do zwiększania strat składników w drodze wymycia, jeśli plony roślin ulegają zmniejszeniu. Z jednej strony aplikacja nawozów do gleb jest konieczna ze względu na dbałość o wysokość plonu, a z drugiej, wymywanie składników (głównie N i P) ma udział w eutrofizacji rzek i jezior. Jednakże zdaniem *Mašauskiene i Mašauskas* (15), zmniejszanie ilości wprowadzanych nawozów nie wpływa automatycznie na obniżenie strat składników pokarmowych, zatem trudno przewidzieć wielkość strat siarki, nawet jeśli utrzymywane są zasady dobrych praktyk w rolnictwie. Podstawą jest jednak zachowywanie zbilansowanego nawożenia oraz wzrost proporcji uprawy poplonów, które mogą także zmniejszyć wymywanie siarki.

Bilans siarki

Zbilansowana gospodarka składnikami pokarmowymi jest jedną z podstaw integrowanej produkcji roślinnej. W bilansach składników bierze się pod uwagę ich przychody ze wszystkich źródeł oraz rozchód z plonami roślin i straty w drodze wymycia. Saldo bilansu dostarcza cennych informacji o poprawności gospodarki omawianym składnikiem nawozowym. Ujemne saldo bilansu wskazuje na ryzyko wystąpienia deficytu składnika dla roślin, natomiast saldo dodatnie – na pewną pulę składnika obecnego w glebie, która jest elementem żyzności gleby i może być pobrana przez roślinę następczą.

Bilans S w doświadczeniach *Ercoli i in.* (3) był pozytywny tylko wtedy, gdy zastosowano jej wysokie dawki, ze względu na to, że więcej siarki było dostarczane niż usuwane z gleby. Nie spodziewano się zatem w krótkim okresie czasu deficytu tego składnika, pod warunkiem, że stosowane dawki są wysokie, a jego

dostępność jest zsynchronizowana z potrzebami roślin. Podobnie badania Ruszkowskiej i in. (22) wskazują, że bilans siarki za okres 4 lat był zrównoważony przy wyższym poziomie nawożenia NPK (420-510-540 kg NPK·ha⁻¹, odpowiednio dla gleby piaskowej, lessowej i gliniastej), a ujemny przy niższych dawkach nawozów (tab. 4). Ponadto, zastosowanie wyższego nawożenia NPK, a zwłaszcza NPK + Ca, skutkuje większym pobraniem siarki przez rośliny uprawne, co również przyczynia się do uzyskania ujemnego bilansu tego składnika. Natomiast w innych doświadczeniach lizymetrycznych (21) stwierdzono dodatni bilans siarki dla większości obiektów, który był wynikiem zmniejszenia ubytku tego składnika przez pozostawienie w glebie słomy i łętów z uprawianych roślin, a także zastosowania odpowiednio większych dawek nawozów, tj. siarczanu magnezu i superfosfatu. Wyniki wymienionych badań wskazują, że duży udział w kształtowaniu bilansu siarki w glebach uprawnych oprócz nawożenia ma także sposób użytkowania (ugorowanie lub uprawa) oraz typ gleby (tab. 6).

Tabela 6

Bilans siarki (g·m²) w doświadczeniu lizymetrycznym

Wyszczególnienie	Obiekt nawozowy			
	Ugór	NPK I + Ca	NPK II + Ca	NPK III + Ca
Gleba piaskowa				
Przychód w nawozach	8,54	19,05	34,09	47,34
Pobranie z plonem	-	5,52	6,15	8,08
Wymycie	18,23	14,24	16,30	7,66
Różnica bilansowa	-9,69	-0,71	+11,64	+31,60
Gleba gliniasta				
Przychód w nawozach	8,54	21,91	36,11	50,43
Pobranie z plonem	-	5,12	7,60	8,02
Wymycie	20,54	22,57	19,57	20,64
Różnica bilansowa	-12,00	-5,78	+8,94	+21,77

Źródło: Ruszkowska i in. 1993 (21), zmodyfikowane

Podsumowanie

Liczne badania wykazują znaczenie dostępności siarki glebowej dla rozwoju roślin oraz potrzebę stosowania nawozów siarkowych, w celu uniknięcia wystąpienia deficytu tego składnika. W uprawie wielu roślin żywienie siarką jest kluczowym czynnikiem dla poprawy wielkości i jakości plonowania. Niestety, siarka podawana do gleby w nawozach jest na ogół wykorzystywana przez rośliny w 30-60%, a tylko w niektórych przypadkach wykorzystanie tego składnika kształtuje się w granicach

50-75% (16). Tylko część składnika z pozostałej puli ulega zaadsorbowaniu przez fazę stałą gleby, a większość podlega wymyciu. Wymywanie jest uważane za jeden z najpoważniejszych czynników prowadzących do zubożenia gleb w siarkę dostępną dla roślin.

Do niedawna uważano, że intensywność produkcji roślinnej (tj. gatunek uprawianych roślin i nawożenie) nie wpływa istotnie na stężenie siarki siarczanowej w wodach drenarskich, a jedynie w przypadku bardzo wysokich dawek nawozów mineralnych zawierających ten składnik istnieje możliwość migracji siarczanów do wód gruntowych (10). Jednakże większość nowych badań potwierdza powiązanie wielkości strat tego składnika w wyniku wymycia z formą nawozu siarkowego, dawką i terminem jego aplikacji, jak również z gatunkiem roślin uprawianych w zmianowaniu. Pewnym poparciem dla tego stwierdzenia są także badania wód z drenów i z rowów melioracyjnych (10). Zatem stosowanie nawozów siarkowych w gospodarstwie powinno być poprzedzone rozpoznaniem fizycznych i chemicznych cech gleby, w tym zasobności gleby w siarkę i jej odczynu oraz potrzebami pokarmowymi roślin ujętych w zmianowaniu. Te czynniki decydują w dużej mierze o dawce, formie i terminie stosowania nawozów zawierających siarkę oraz mogą w konsekwencji decydować o ograniczeniu strat tego składnika poprzez wymycie. Dzięki temu możliwe jest większe wykorzystanie siarki przez rośliny dla poprawy wielkości i jakości plonu. Działania te mogą również spowodować utrzymanie dodatniego salda bilansu siarki w glebie.

Literatura

1. Alves M.E., Lavorenti A.: Sulphate adsorption and its relationships with properties of representative soils of the São Paulo State, Brazil. *Geoderma*, 2004, **118**: 89-99.
2. Cooper M., Hogg D.E.: Leaching losses of sulphate from superphosphate and gypsum applied on a soil from rhyolitic pumice. *N.Z. Jl. Agric. Res.*, 1965, **9**: 345-349.
3. Ercoli L., Arduini I., Mariotti M., Lulli L., Masoni A.: Management of sulfur fertiliser to improve durum wheat production and minimize S leaching. *Eur. J. Agron.*, 2012, **38**: 74-82.
4. Eriksen J.: Sulfur cycling in temperate agricultural systems. *Adv. Agron.*, 2009, **102**: 55-89.
5. Fageria N.K.: Sulfur. [In:] *The use of nutrients in crop plants*. Taylor and Francis Group, Boca Raton, 2009, 215-240.
6. Filipek T., Skowrońska M.: Aktualnie dominujące przyczyny oraz skutki zakwaszenia gleb użytkowanych rolniczo w Polsce. *Acta Agrophys.*, 2013, **20(2)**: 283-294.
7. Filipek-Mazur B.: Siarka w środowisku. [W:] *Środowiskowe aspekty stosowania nawozów i środków ochrony roślin w rolnictwie*, pod red. B. Filipek-Mazur. Wyd. Uniwersytetu Rolniczego w Krakowie, Kraków, 2011, 99-122.
8. Friesen D.K.: Fate and efficiency of sulfur fertilizer applied to food crops in West Africa. [In:] *Alleviating soil fertility constraints to increase crop production in West Africa*, A.U. Mokwunye (Ed.). Kluwer Academic Publishers, 1991, 59-68.

9. Gondek K.: Nawożenie a wymywanie makroelementów i pierwiastków śladowych z gleb. [W:] Środowiskowe aspekty stosowania nawozów i środków ochrony roślin w rolnictwie, pod red. B. Filipek-Mazur. Wyd. Uniwersytetu Rolniczego w Krakowie, Kraków, 2011, 79-98.
10. Igras J.: Zawartość składników mineralnych w wodach drenarskich z użytków rolnych w Polsce. Monografie i Rozprawy Naukowe IUNG, Puławy, 2004, 13, ss. 123.
11. Jaguś A.: Zmiany jakościowe odpływów glebowych w warunkach recesji gospodarki nawozowej (na przykładzie górskich użytków zielonych). Monitoring Środowiska Przyrodniczego, Kieleckie Towarzystwo Naukowe, Kielce, 2008, 9: 63-69.
12. Kertesz M.A., Mirleau P.: The role of soil microbes in plant sulfur nutrition. J. Exp. Bot., 2004, 55(404): 1939-1945.
13. Kopáček J., Hejzlar J., Porcal P., Posch M.: Sulphate leaching from diffuse agricultural and forest sources in a large central European catchment during 1900-2010. Sci. Total Environ., 2014, 470-471: 543-550.
14. Lityński T., Jurkowska H.: Żyzność gleby i odżywianie się roślin. PWN, Warszawa, 1982, ss. 643.
15. Mašauskienė A., Mašauskas V.: Soil sulphur problems and management. [W:] Sustainable agriculture. Part B. Reducing nutrient losses from agriculture, Ch. Jacobsson (Ed.). CSD Upsala, 2012, 113-116.
16. McGrath S.P., Zhao F.J.: Sulphur uptake, yield responses and the interaction between nitrogen and sulphur in winter oilseed rape (*Brassica napus*). J. Agric. Sci., 1996, 126: 53-62.
17. Mesić M., Kisić I., Bašić F., Butorac A., Zgorelec Ž., Gašpar I.: Losses of Ca, Mg and SO_4^{2-} with drainage water at fertilisation with different nitrogen rates. Agriculturae Conspectus Scientificus, 2007, 72(1): 53-58.
18. Podleśna A.: Dynamika wymywania azotu z gleb uprawnych w warunkach doświadczenia lizymetrycznego. [W:] Warsztaty Naukowe „Rozpraszanie zanieczyszczeń z rolnictwa do środowiska”, IUNG-PIB Puławy, 22.06.2012 r., ss. 45.
19. Quina M.J., Bordado J.C.M., Quinta-Ferreira R.M.: The influence of pH on the leaching behaviour of inorganic compounds from municipal solid waste APC residues. Waste Manage., 2009, 29: 2483-2493.
20. Riley N.G., Zhao F.J., McGrath S.P.: Leaching losses of sulphur from different forms of sulphur fertilizers: a field lysimeter study. Soil Use Manage., 2002, 18: 120-126.
21. Ruszkowska M., Sykut S., Rębowska Z., Kusio M.: Bilans składników pokarmowych w doświadczeniu lizymetrycznym (1985-1989). II. Bilans wapnia, magnezu i siarki. Pam. Puł., 1993, 103: 79-97.
22. Ruszkowska M., Warchołowa M., Rębowska Z., Sykut S.: Bilans składników pokarmowych w doświadczeniu lizymetrycznym (1977-1981). II. Bilans wapnia, magnezu i siarki. Pam. Puł., 1984, 82: 29-50.
23. Siebielec G., Smreczak B., Klimkowicz-Pawlas A., Maliszewska-Kordybach B., Terelak H., Koza P., Łysiak M., Gałązka R., Pecio M., B. Suszek, Miturski T., Hryńczuk B.: Monitoring chemizmu gleb ornych w Polsce w latach 2010-2012. Biblioteka Monitoringu Środowiska. Warszawa, 2012, ss. 196.

24. Sykut S.: Dynamika procesu wymywania składników mineralnych z gleb w doświadczeniu lizymetrycznym. I. Aniony. Pam. Puł., 1993, **103**: 11-35.
25. Tabatabai M. A.: Physicochemical fate of sulfate in soils. JAPCA, 1987, **37(1)**: 34-38.
-

Adres do korespondencji:

*dr hab. Anna Podleśna, prof. nadzw.
Zakład Żywienia Roślin i Nawożenia
IUNG-PIB
ul. Czartoryskich 8
24-100 Puławy
tel. 81 47 86 835
e-mail: ap@iung.pulawy.pl*

W serii wydawniczej „RAPORTY PIB”, a od 2007 r. „STUDIA I RAPORTY IUNG-PIB” ukazały się następujące pozycje:

1. *Wybrane aspekty agrochemicznych badań gleby*. Puławy, 2006.
2. *Zasady wprowadzania nawozów do obrotu*. Puławy, 2006.
3. *Regionalne zróżnicowanie produkcji rolniczej w Polsce*. Puławy, 2006.
4. *Monitoring skutków środowiskowych planu rozwoju obszarów wiejskich*. Puławy, 2007.
5. *Sprawdzenie przydatności wskaźników do oceny zrównoważonego gospodarowania zasobami środowiska rolniczego w wybranych gospodarstwach, gminach i województwach*. Puławy, 2007.
6. *Możliwości rozwoju rolnictwa ekologicznego w Polsce*. Puławy, 2007.
7. *Współczesne uwarunkowania organizacji produkcji w gospodarstwach rolniczych*. Puławy, 2007.
8. *Efektywne i bezpieczne metody regulacji zachwaszczenia, nawożenia i uprawy roli*. Puławy, 2007.
9. *Wybrane elementy technologii produkcji roślinnej*. Puławy, 2007.
10. *Problem erozji gleb w procesie przemian strukturalnych na obszarach wiejskich*. Puławy, 2008.
11. *Uprawa roślin energetycznych a wykorzystanie rolniczej przestrzeni produkcyjnej w Polsce*. Puławy, 2008.
12. *Wybrane zagadnienia systemów informacji przestrzennej i obszarów problemowych rolnictwa w Polsce*. Puławy, 2008.
13. *Tworzenie postępu biologicznego w hodowli tytoniu i chmielu*. Puławy, 2008.
14. *Kierunki zmian w produkcji roślinnej w Polsce do roku 2020*. Puławy, 2009.
15. *Wybrane elementy regionalnego zróżnicowania rolnictwa w Polsce*. Puławy, 2009.
16. *Systemy wspomagania decyzji w zrównoważonej produkcji roślinnej*. Puławy, 2009.
17. *Stan i kierunki zmian w produkcji rolniczej (wybrane zagadnienia)*. Puławy, 2009.
18. *Produkcyjne i środowiskowe aspekty współczesnych metod nawożenia i regulacji zachwaszczenia*. Puławy, 2009.
19. *Oddziaływanie rolnictwa na środowisko przyrodnicze w warunkach zmian klimatu*. Puławy, 2010.
20. *Ocena zrównoważenia gospodarowania zasobami środowiska rolniczego w wybranych gospodarstwach, gminach, powiatach i województwach*. Puławy, 2010.
21. *Możliwości rozwoju obszarów problemowych rolnictwa (OPR) w świetle PROW 2007–2013*. Puławy, 2010.
22. *Możliwości rozwoju gospodarstw o różnych kierunkach produkcji rolniczej w Polsce*. Puławy, 2010.
23. *Związki fitogeniczne jako naturalna alternatywa antybiotykowych promotorów wzrostu*. Puławy, 2010.
24. *Wybrane aspekty przemian strukturalnych na obszarach wiejskich*. Puławy, 2010.
25. *Stan obecny i perspektywy nawożenia roślin w Polsce w aspekcie regulacji prawnych*. Puławy, 2010.
26. *Stan obecny i perspektywy rozwoju rolnictwa ekologicznego w Polsce*. Puławy, 2010.

- 27(1). *Środowiskowe skutki działalności rolniczej i wdrażania PROW na obszarach problemowych rolnictwa*. Puławy, 2011.
- 28(2). *Techniki i technologie stosowane w produkcji roślinnej a środowisko przyrodnicze*. Puławy, 2012.
- 29(3). *Problemy zrównoważonego gospodarowania w produkcji rolniczej*. Puławy, 2012.
- 30(4). *Doskonalenie integrowanych technologii produkcji zbóż jarych i roślin pastewnych ze szczególnym uwzględnieniem początkowych elementów agrotechniki*. Puławy, 2012.
- 31(5). *Rola badań naukowych w kształtowaniu postępu w produkcji chmielu i tytoniu*. Puławy, 2012.
- 32(6). *Wybrane aspekty zrównoważonego rozwoju i specjalizacji gospodarstw rolniczych*. Puławy, 2013.
- 33(7). *Działalność Instytutu Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa – PIB w Puławach w zakresie wspierania doradztwa i praktyki rolniczej*. Puławy, 2013.
- 34(8). *Problemy gospodarki nawozowej w Polsce*. Puławy, 2013.
- 35(9). *Zagrożenia dla prawidłowego funkcjonowania gleb użytkowanych rolniczo – wybrane zagadnienia*. Puławy, 2013.
- 36(10). *Zmiany w technologiach produkcji roślinnej – oceny i wpływ na środowisko rolnicze*. Puławy, 2014.
- 37(11). *Dobre praktyki w nawożeniu*. Puławy, 2014.
- 38(12). *Jakość informacji w systemach wspomagania decyzji*. Puławy, 2014.
- 39(13). *Wykorzystanie odnawialnych źródeł energii pochodzenia rolniczego i ich wpływ na środowisko*. Puławy, 2014.
- 40(14). *Wybrane problemy rolnictwa polskiego z uwzględnieniem stanu jego zrównoważenia*. Puławy, 2014.
- 41(15). *Technologie produkcji zbóż i roślin pastewnych warunkujące wysoki plon i dobrą jakość*. Puławy, 2014.
- 42(16). *Podstawy nowoczesnego doradztwa nawozowego w Polsce*. Puławy, 2015.
- 43(17). *Wybrane problemy produkcji rolniczej z uwzględnieniem aspektu dóbr publicznych*. Puławy, 2015.
- 44(18). *Wybrane zagadnienia produkcji roślinnej w Polsce*. Puławy, 2015.
- 45(19). *Kształtowanie żyzności gleby*. Puławy, 2015.
- 46(20). *Wybrane zagadnienia związane z ochroną gleb przed degradacją*. Puławy, 2015.
- 47(1). *Problemy produkcji rolniczej w Polsce w kontekście ich oddziaływania na środowisko*. Puławy, 2016.

WSKAZÓWKI DLA AUTORÓW

W serii wydawniczej „**STUDIA I RAPORTY IUNG-PIB**” publikowane są recenzowane prace z zakresu agronomii oraz ochrony i kształtowania środowiska rolniczego, wykonane w ramach zadań programów wieloletnich pn. „Kształtowanie środowiska rolniczego Polski oraz zrównoważony rozwój produkcji rolniczej” (2005-2010) oraz „Wspieranie działań w zakresie kształtowania środowiska rolniczego i zrównoważonego rozwoju produkcji rolniczej w Polsce” (2011-2015). W zeszytach problemowych o charakterze monografii, wydawanych w ramach tej serii, mogą być zamieszczane również prace autorów spoza IUNG-PIB, które merytorycznie mieszczą się w tematyce zadań programu wieloletniego. **Publikowane są prace problemowe, głównie mające charakter przeglądowy, z podkreśleniem znaczenia omawianych zagadnień dla rolnictwa polskiego.**

Wydruk tekstu do recenzji:

czcionka 12 p., z odstępem 1,5-wierszowym.

Przygotowanie do druku:

- tekst i tabele w programie Word, wersja 6.0 lub wyższa
- czcionka – Times New Roman
- układ pracy: słowa kluczowe, wstęp, wyniki i dyskusja bądź omówienie wyników, podsumowanie lub wnioski, literatura

tekst

- czcionka – 11 p. (spis pozycji literatury – 9 p.)
- wcięcie akapitowe – 0,5 cm

tabele

- podział na wiersze i kolumny (z funkcji tworzenia tabel)
- szerokość dokładnie 13 cm (tabele w pionie) lub 19 cm (tabele w poziomie)
- czcionka 9 p., pojedyncze odstępy międzywierszowe
- pod tabelą przypis ze wskazaniem źródła danych (autorstwa)

rysunki

- czarno-białe
- wykresy w programie Word lub Excel
- wymiary w zakresie 13 cm × 19 cm
- w podpisach czcionka 9 p.
- na płycie lub innym nośniku w oddzielnych plikach
- pod rysunkiem przypis ze wskazaniem źródła danych (autorstwa)

jednostki miary

- system SI
- jednostki zapisywać potęgowo (np. t·ha⁻¹)

literatura

- spis literatury na końcu pracy w układzie alfabetycznym wg nazwisk autorów, w kolejności: nazwisko (pismo rozstrzelone), pierwsza litera imienia, tytuł pracy, miejsce publikacji: tytuł wydawnictwa (wg ogólnie przyjętych skrótów tytułów czasopism), rok, numer (pismo pogrubione), strony,
- cytowanie w tekście – jako numer pozycji ze spisu literatury (w nawiasach okrągłych) lub dodatkowo z nazwiskiem autora (pismo rozstrzelone).

Pracę do recenzji należy złożyć w 1 egzemplarzu. Po recenzji oryginalny egzemplarz recenzowany złożyć/przesłać do Redakcji, a ostateczną wersję pracy, uwzględniającą uwagi recenzenta i redaktora, przesłać e-mailem.

Dane kontaktowe:

mgr Ewa Decka-Cywińska

Dział Upowszechniania i Wydawnictw IUNG-PIB

ul. Czartoryskich 8, 24-100 Puławy

e-mail: edeka@iung.pulawy.pl

