

Alicja Pecio

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

TEORETYCZNE PODSTAWY OKREŚLANIA WYMAGAŃ POKARMOWYCH ROŚLIN I POTRZEB NAWOŻENIA*

Słowa kluczowe: potrzeby pokarmowe roślin, potrzeby nawożenia, testy glebowe, testy roślinne

Wstęp

Nawożenie jest jednym z najważniejszych czynników decydujących o poziomie plonowania i jakości produktów roślinnych, a jednocześnie jest elementem znaczącej ingerencji człowieka w środowisko naturalne. Najważniejszym z działań ograniczających straty biogenów z rolnictwa jest optymalizacja nawożenia, czyli dostosowanie dawek nawozów do rzeczywistych potrzeb oraz stosowanie nawozów we właściwym czasie i w odpowiedni sposób. Zagrozeniem dla środowiska wodnego są bowiem składniki dostarczane na pola uprawne w nawozach, lecz niewykorzystane przez rośliny. W warunkach optymalnych dla wzrostu, rośliny pobierają duże ilości składników pokarmowych, czego efektem są wysokie plony. Działanie czynników ograniczających wzrost sprawia, że duża część zastosowanej dawki nawozów pozostaje w glebie i może przedostawać się do środowiska wodnego. Dlatego też we współczesnym rolnictwie dąży się do tzw. nawożenia zrównoważonego, co oznacza, że ilości składników dostarczane w nawozach powinny odpowiadać ich pobraniu z plonami roślin. Dobór właściwych dawek nawozów opiera się na określaniu potrzeb pokarmowych roślin i potrzeb nawozowych uwzględniających glebowe zasoby składników pokarmowych.

Potrzeby pokarmowe roślin

Potrzeby pokarmowe roślin odpowiadają ilości składnika, jaką roślina musi pobrać, aby wydać osiągalny plon, tzn. plon możliwy do uzyskania na glebie danego

*Opracowanie wykonano w ramach zadania 1.1 pt. „Nawożenie użytków rolnych” z dotacji budżetowej przeznaczonej na realizację zadań MRiRW w 2021 r.

kompleksu przydatności rolniczej przy normalnym przebiegu pogody i optymalnym zaopatrzeniu w składniki pokarmowe, względnie plon oszacowany przez rolnika na podstawie własnego doświadczenia. Określane są przez pobranie z plonem, a wyznaczane jako iloczyn prognozowanego w danych warunkach plonu i jednostkowego pobrania składnika, tzn. pobrania potrzebnego do wyprodukowania jednostki plonu. Pobranie jednostkowe wynika z procentowej zawartości składników pokarmowych w plonie głównym i ubocznym oraz ze stosunku masy plonu głównego i ubocznego (tab. 1):

$$\text{Potrzeby pokarmowe} = \text{prognozowany plon} \times \text{pobranie jednostkowe}$$

Tabela 1

Średnie pobranie makro- i mikroelementów przez wybrane rośliny uprawne w przeliczeniu na 1 t plonu głównego wraz z odpowiednią ilością produktu ubocznego

Roślina	Pobranie makroelementów (kg)						Pobranie mikroelementów (g)				
	N	P	K	Mg	Ca	S	B	Cu	Mn	Zn	Mo
Pszonica ozima – ziarno	27	4,7	15,6	2,3	3,6	4,1	5	8	82	59	0,7
Pszonica jara – ziarno	30	5,4	18,1	2,3	4,2	4,1	5	8	106	71	0,7
Kukurydza – ziarno	33	6,3	34,6	5,7	6,7	6,6	11	14	107	85	0,9
Rzepak – nasiona	51	10,1	51,1	5,7	41,3	12,5	51	10	100	64	1,0
Bobik – nasiona	60	6,0	31,5	3,3	14,9	6,0	32	19	45	96	1,3
Ziemniak – bulwy*	3,4	0,6	5,6	0,3	0,4	1,5	2	2	6	6	0,1
Burak cukr. – korzenie*	5,8	0,8	6,9	1,1	5,0	1,0	7	3	28	14	0,2
Koniczyna czerw.– ziel.*	5,5	0,6	5,1	0,5	2,7	1,5	4	2	13	9	0,1

*świeża masa

Źródło: Kocoń, 2014 (12), Rozporządzenie..., 2020 (15)

Potrzeby nawozowe

Potrzeby nawozowe określają ilość składników, jaką należy dostarczyć roślinom, aby mogły pokryć swoje potrzeby pokarmowe. Mogą one być częściowo zaspokojone z rezerw składników nagromadzonych w glebie, z nawozów organicznych lub z przyoranych produktów ubocznych przedplonu itp. Pozostałą część należy uzupełnić w nawozach mineralnych, których dawki można wyznaczać trzema metodami: z wykorzystaniem funkcji produkcji, na podstawie testów glebowych lub roślinnych oraz opierając się na bilansie składników nawozowych.

Funkcje produkcji

Funkcja produkcji opisuje zależność pomiędzy plonem rośliny a zastosowaną dawką nawozu, z wykorzystaniem funkcji matematycznej i odpowiadającego jej wykresu. Funkcje wyznaczane są na podstawie wyników doświadczeń ścisłych

z możliwie dużą liczbą dawek składnika. Liczba funkcji matematycznych jest bardzo duża, a wyboru jednej z nich dokonuje się na podstawie analizy statystycznej oceniającej odchylenie danych doświadczalnych od danych wyznaczonych z funkcji. Im odchylenia są mniejsze, tym funkcja jest lepiej dopasowana. Obok tego zasadniczego kryterium bierze się pod uwagę także prostotę posługiwania się funkcją i możliwość wyznaczenia ekstremum. Do najczęściej wykorzystywanych funkcji należy funkcja wielomianowa kwadratowa, o ogólnej postaci:

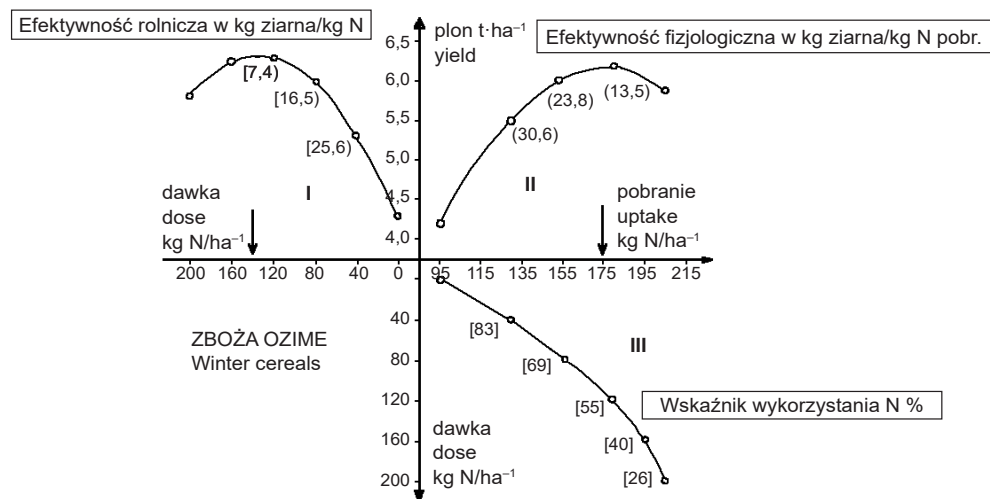
$$\text{Plon} = a + b \times \text{dawka azotu} \times c \times \text{dawka azotu}^2$$

gdzie:

a, b, c – współczynniki regresji.

Ekstremum funkcji odpowiada optymalnej produkcyjnie dawce nawozu, która zapewnia uzyskanie maksymalnego plonu. Po przekroczeniu tej dawki następuje spadek plonu. Plon i dawka mogą być wyrażone w mierniku wartościowym i wówczas ekstremum funkcji odpowiada optymalnej ekonomicznie dawce nawozów, która zapewnia maksymalny zysk.

Funkcje produkcji można przedstawić w postaci trzyczęściowych diagramów, jak na rysunku 1, gdzie obok zależności plon–dawka (część I) zaprezentowano zależności plon–pobranie azotu (część II) oraz dawka–pobranie azotu (część III). Umożliwia to odniesienie uzyskanych wyników do warunków innych od tych, w jakich było prowadzone doświadczenie.



Rys. 1. Diagram efektywności nawożenia zbóż azotem

Źródło: Fotyma, 2000 (3)

Testy glebowe

W grupie testów glebowych wiodącą pozycję zajmują testy chemiczne polegające na ekstrakcji i oznaczaniu zawartości tzw. przyswajalnych form składników mineralnych, które stanowią sumę składników w formie aktywnej i określonej ich ilości w formie ruchomej (6). Forma aktywna obejmuje jony proste i kompleksowe danego pierwiastka, znajdujące się w roztworze glebowym. Forma ruchoma to składniki w związkach rozpuszczalnych lub adsorbowane przez fazę stałą gleby. Składniki w formie aktywnej są bezpośrednio dostępne dla korzeni roślin, ale ich aktualne stężenie w roztworze glebowym jest na ogół zbyt małe w zestawieniu z potrzebami pokarmowymi roślin. Składniki w formie aktywnej są uzupełniane z formy ruchomej w wyniku procesów rozpuszczania lub desorpcji z fazy stałej gleby. Procesy te zachodzą stosunkowo szybko w skali jednego okresu wegetacyjnego.

Opracowanie testu glebowego przebiega w trzech etapach: wybór metody analitycznej, kalibracja testu oraz wyznaczenie wielkości dawek nawozów dla przedziałów (klas) wartości testu. Wybór metody analitycznej w przypadku chemicznych testów glebowych dotyczy przede wszystkim rodzaju ekstrahenta, który decyduje o tym, jakie formy składnika będą oznaczane.

W Polsce badania odczynu i zasobności gleb w przyswajalne formy makro- i mikroelementów prowadzone są według jednolitej metodyki opartej na Polskich Normach i wytycznych IUNG w Puławach. W tym celu, dla określenia podstawowych właściwości chemicznych gleb mineralnych wykorzystuje się następujące metody:

- pH – 1 mol KCl·dm⁻³
- fosfor i potas przyswajalny – metoda Egnera-Riehma (DL),
- magnez przyswajalny – metoda Schachtschabela (CaCl₂ 0,0125 mol·dm⁻³).

Dodatkowo coraz częściej badany jest azot mineralny, do którego ekstrakcji stosuje się 1% roztwór K₂SO₄, a także mikroelementy. Te ostatnie oceniano po ekstrakcji gleby wyciągiem 1 mol HCl·dm⁻³ metodą Rinkinsa. Metoda ta jest jednak dość często krytykowana, aczkolwiek umożliwia ekstrakcję wszystkich niezbędnych dla roślin mikroelementów – B, Cu, Mn, Fe, Zn. Aktualnie stacje chemiczno-rolnicze mają możliwość oznaczania zawartości zarówno makroskładników (P, K, Mg), jak i mikroelementów (B, Cu, Fe, Mn, Zn) w jednym wyciągu według metody Mehlich 3.

Kalibracja testu polega na wyznaczeniu jego wartości (lub przedziału) krytycznej oraz przedziałów zawartości niedoborowych i nadmiarowych. Najczęściej dokonywana jest na podstawie wyników doświadczeń, w których wyznacza się zależność pomiędzy reakcją roślin na nawożenie i wartością testu. Górną granicą zawartości optymalnej jest wartość, powyżej której nie obserwuje się przyrostu plonu pod wpływem nawożenia danym składnikiem. Przedziały zawartości niskich są w zasadzie określane arbitralnie w zależności od stopnia redukcji plonu. Dla testów glebowych stosowanych powszechnie w Polsce do oceny pH i zawartości podstawowych makro-

składników wyznaczono 5 przedziałów odczynu i zasobności. Wyznaczenie wielkości optymalnej dawki nawozu dla przedziałów wartości testu wymaga prowadzenia doświadczeń ze wzrastającymi dawkami nawozów na tle zróżnicowanej zawartości składników w glebie lub roślinie. W tym miejscu metoda testów łączy się z metodą funkcji produkcji.

Do 2020 r. ocena odczynu i zasobności gleb w składniki mineralne dokonywana była na podstawie liczb granicznych zawartych w polskich normach: PN-ISO 10390 (pH), PN-R-04023 (fosfor), PN-R-04022 (potas) i PN-R-04020 (magnez). Liczby graniczne przedstawia się zależnie od kategorii agronomicznej gleby, którą wyznacza zawartość części spławialnych (frakcja <0,02 mm) (tab. 2–7).

Tabela 2

Kategorie agronomiczne gleby

Kategoria	Grupa	Zawartość części spławialnych (%)
I – gleby bardzo lekkie	pl, plp, ps, psp	0–10
II – gleby lekkie	pgl, pglp, pgm, pgmp, plp, plz	11–20
III – gleby średnie	gl, glp, plg	21–35
IV – gleby ciężkie	gs, gsp, gc, gcp, pli, i, ip	>35

Źródło: Zalecenia nawozowe, 1990 (22)

Tabela 3

Ocena odczynu gleby

pH	Ocena zakwaszenia gleb
<4,5	bardzo kwaśne
4,6–5,5	kwaśne
5,6–6,5	lekko kwaśne
6,6–7,2	obojętne
>7,2	zasadowe

Źródło: Zalecenia nawozowe, 1990 (22)

Tabela 4

Ocena zasobności gleb w magnez przyswajalny

Klasa zasobności	Zasobność	mg Mg·100 g ⁻¹ gleby			
		bardzo lekkie	lekkie	średnie	ciężkie
V	bardzo niska	<1,0	<2,0	<3,0	<4,0
IV	niska	1,1–2,0	2,1–3,0	3,1–5,0	4,1–6,0
III	średnia	2,1–4,0	3,1–5,0	5,1–7,0	6,1–10,0
II	wysoka	4,1–6,0	5,1–7,0	7,1–9,0	10,1–14,0
I	bardzo wysoka	>6,1	>7,1	>9,1	>14,1

Źródło: Zalecenia nawozowe, 1990 (22)

Tabela 5

Ocena zasobności gleb organicznych w magnez przyswajalny

Klasa zasobności	Zasobność	mg Mg · 100 g ⁻¹ suchej masy gleby
V	bardzo niska	<20
IV	niska	21–40
III	średnia	41–80
II	wysoka	81–120
I	bardzo wysoka	>121

Źródło: Fotyma, 1987 (7)

Tabela 6

Ocena zawartości fosforu oznaczonego metodą Egnera-Riehma (mg P₂O₅ · 100 g⁻¹ gleby) w glebach mineralnych i węglanowych

Gleby	Zawartość w glebie				
	bardzo niska	niska	średnia	wysoka	bardzo wysoka
Mineralne	do 5,0	5,1–10,0	10,1–15,0	15,1–20,0	od 20,1
Węglanowe	do 5,0	5,1–10,0	10,1–20,0	20,1–40,0	od 40,1

Źródło: Zalecenia nawozowe, 1990 (22)

Tabela 7

Ocena zawartości potasu oznaczonego metodą Egnera-Riehma (mg K₂O · 100 g⁻¹ gleby) w glebach mineralnych

Kategoria agronomiczna gleby	Zawartość w glebie				
	bardzo niska	niska	średnia	wysoka	bardzo wysoka
Bardzo lekkie	do 2,5	2,6–7,5	7,6–12,5	12,6–17,5	od 17,6
Lekkie	do 5,0	5,1–10,0	10,1–15,0	15,1–20,0	od 20,1
Średnie	do 7,5	7,6–12,5	12,6–20,0	20,1–25,0	od 25,1
Ciężkie	do 10,0	10,1–15,0	15,1–25,0	25,1–30,0	od 30,1

Źródło: Zalecenia nawozowe, 1990 (22)

Test Nmin

Test glebowy azotu mineralnego (Nmin) (2, 6) polega na oznaczeniu zawartości mineralnych form azotu w warstwie gleby, w której umieszczona jest główna masa korzeni roślin. Zawartość azotu mineralnego (suma N-NO₃ i N-NH₄) wyrażana jest w kg · ha⁻¹ do głębokości 60 lub 90 cm w profilu glebowym na powierzchni 1 ha i w przeciwieństwie do testów dla fosforu i potasu bezpośrednio odnoszona do potrzeb pokarmowych roślin. Przedziały zawartości Nmin w warstwie 0–60 cm w zależności od kategorii agronomicznej gleby zamieszczono w tabeli 8.

Tabela 8

Zawartość azotu mineralnego w glebie ($\text{kg N}\cdot\text{ha}^{-1}$) do głębokości 60 cm wczesną wiosną zależnie od kategorii agronomicznej

Kategoria agronomiczna gleby	Zawartość w glebie				
	bardzo niska	niska	średnia	wysoka	bardzo wysoka
Bardzo lekka	≤ 30	31–50	51–70	71–90	> 90
Lekka	≤ 40	41–60	61–80	81–100	> 100
Średnia i ciężka	≤ 50	51–70	71–90	91–100	> 100

Źródło: Jadczyzyn i in., 2012 (11)

Test opracowano przede wszystkim na potrzeby doradztwa nawozowego i stosowany jest do uściślenia pierwszej dawki nawozów azotowych. Jeśli wykonano analizę zawartości N_{min} w glebie, można wykorzystać jej wynik do korekty planowanej dawki nawozów azotowych:

- jeśli wynik testu wykazuje wysoką lub bardzo wysoką zawartość składnika w glebie do głębokości 60 cm, to planowaną dawkę nawozów można zmniejszyć o różnicę pomiędzy zawartością N_{min} stwierdzoną w glebie pobranej z pola i górną granicą zawartości średniej dla takiej gleby;
- w przypadku zawartości bardzo niskiej lub niskiej zalecaną dawkę N należy zwiększyć o różnicę pomiędzy dolną granicą zawartości średniej i oznaczoną ilością N_{min} w glebie;
- jeśli wynik testu mieści się w przedziale zawartości średniej, dawka N pozostaje bez zmian.

Mikroelementy

Do oceny zawartości mikroelementów dotychczas stosowano trzystopniową skalę oceny zawartości: niska, średnia i wysoka (tab. 9). Aktualnie zarówno dla metody 1 M HCl, jak i dla metody Mehlich 3, wprowadzono skalę dwustopniową: zawartość niska i wystarczająca. Obydwie metody wymagają różnych liczb granicznych ze względu na zróżnicowany poziom zawartości mikroelementów oznaczany tymi metodami (tab. 9–10). Jeśli wynik analizy gleby jest mniejszy od liczby granicznej podanej w tabeli, to zawartość klasyfikujemy jako niską, przy której nawożenie danym mikroelementem jest konieczne. Zawartość składnika w glebie większa lub równa liczbie granicznej uznawana jest za wystarczającą, przy której nawożenie danego gatunku rośliny nie jest potrzebne.

Tabela 9

Liczby graniczne niskiej zawartości mikroelementów w glebie oznaczonych metodą 1 M HCl dla pszenicy i kukurydzy

Gatunek rośliny	Bor (B)		Miedź (Cu)		Żelazo (Fe)		Mangan (Mn)		Cynk (Zn)	
	cecha gleby	zawartość (mg·kg ⁻¹)	cecha gleby	zawartość (mg·kg ⁻¹)	cecha gleby	zawartość (mg·kg ⁻¹)	cecha gleby	zawartość (mg·kg ⁻¹)	cecha gleby	zawartość (mg·kg ⁻¹)
Pszenica	kat. agron.		Corg (%)		Corg (%)		pH		pH	
	b. lekkie i lekkie	<0,4	≤1,0	<2,2	≤1,0	<700	≤5,5	<60	≤5,5	<4,5
	średnie	<0,7	1,1-1,5	<3,0	1,1-1,5	<800	5,6-6,5	<100	5,6-6,5	<6,0
	ciężkie	<0,9	1,6-2,0	<3,4	1,6-2,0	<900	6,6-7,2	<130	6,6-7,2	<7,5
			≥2,1	<4,2	≥2,1	<1000	≥7,3	<150	≥7,3	<8,5
Kukurydza	kat. agron.		Corg (%)		Corg (%)		pH		pH	
	b. lekkie i lekkie	<0,5	≤1,0	<1,8	≤1,0	<700	≤5,5	<70	≤5,5	<6,0
	średnie	<0,9	1,1-1,5	<2,5	1,1-1,5	<900	5,6-6,5	<100	5,6-6,5	<7,0
	ciężkie	<1,4	≥1,6	3,8	≥1,6	<1100	≥6,6	<130	≥6,6	<9,0

Źródło: Korzeniowska i in., 2021 (13)

Tabela 10

Liczby graniczne niskiej zawartości mikroelementów w glebie oznaczonych metodą Mehlich 3 dla pszenicy i kukurydzy

Gatunek rośliny	Bor (B)		Miedź (Cu)		Żelazo (Fe)		Mangan (Mn)		Cynk (Zn)	
	cecha gleby	zawartość (mg·kg ⁻¹)	cecha gleby	zawartość (mg·kg ⁻¹)	cecha gleby	zawartość (mg·kg ⁻¹)	cecha gleby	zawartość (mg·kg ⁻¹)	cecha gleby	zawartość (mg·kg ⁻¹)
Pszenica	pH		Corg (%)		P _{M3} (mg·kg ⁻¹)		pH		P _{M3} (mg·kg ⁻¹)	
	≤5,5 5,6–6,5 6,6–7,2 ≥7,3	<0,10 <0,25 <0,40 <0,55	≤1,0 1,1–1,5 1,6–2,0 ≥2,1	<1,4 <1,6 <1,8 <2,2	≤100 101–200 ≥201	<190 <240 <280	≤5,5 5,6–6,5 6,6–7,2 ≥7,3	<30 <45 <60 <75	≤100 101–200 201–3002 ≥301	<3,0 <3,5 <4,5 <6,0
Kukurydza	kat. agron		Corg (%)		P _{M3} (mg·kg ⁻¹)		pH		P _{M3} (mg·kg ⁻¹)	
	b. lekkie i lekkie średnie ciężkie	<0,20 <0,40 <0,80	≤1,0 1,1–2,0 ≥2,1	<1,0 <1,3 <1,6	≤100 101–200 ≥201	<160 <230 <270	≤5,5 ≥5,6	<35 <55	≤100 101–200 201–300 ≥301	<3,0 <4,0 <5,0 <7,0

Źródło: Korzeniowska i in., 2021 (13)

Testy roślinne

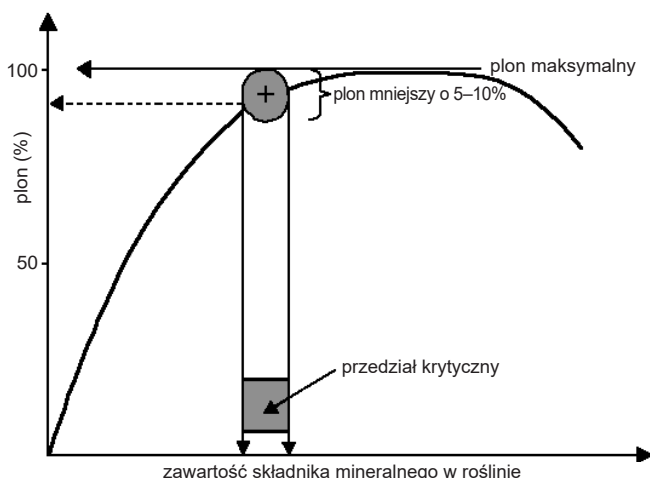
Metody bezpośrednie

Testy roślinne służące do bezpośredniej oceny stanu odżywienia roślin opierają się na analizach chemicznych. Pozwalają one określić całkowitą zawartość badanego składnika lub też jego formę w wybranych częściach wskaźnikowych roślin, np. w liściach czy korzeniach oraz w całych częściach nadziemnych roślin. Uzyskane wyniki podaje się w procentach zawartości (makroelementy) lub w $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (mikroelementy), najczęściej w odniesieniu do suchej masy. Analizy chemiczne zawartości pierwiastków wykonuje się w masie roślin oraz niekiedy w soku komórkowym. Wynik analizy jest zależny od fazy rozwojowej rośliny i badanego jej organu, gdyż zawartości poszczególnych pierwiastków ulegają ciągłym zmianom w okresie wegetacji. Wraz z wiekiem rośliny udział trzech głównych makroskładników: azotu, fosforu i potasu maleje, a zawartość wapnia, magnezu i siarki oraz mikroskładników – na ogół wzrasta.

Wśród metod opartych na analizach suchej masy roślin w praktyce stosuje się najczęściej metodę przedziałów krytycznych, test NNI i metodę DRIS.

Metoda przedziałów krytycznych

Przedział krytyczny określa poziom zawartości składnika pokarmowego w roślinie, który zapewnia uzyskanie plonu lub szybkości wzrostu rośliny na poziomie 95–100% wartości maksymalnych. W metodzie tej zakłada się istotny wpływ fazy rozwojowej rośliny i jej stanu odżywienia na realizację 95–100% plonu maksymalnego uprawianej odmiany, zgodnie ze schematem na rysunku 2.



Rys. 2. Graficzna ilustracja przedziału krytycznego składnika mineralnego w roślinie

Przedział krytyczny (przedział zawartości optymalnych) dla danego gatunku wyznaczany jest za pomocą dwóch parametrów oceny szybkości wzrostu rośliny: względnej szybkości wzrostu (RGR, ang. *Relative Growth Rate*) i absolutnej szybkości wzrostu łanu (ACGR, ang. *Absolute Crop Growth Rate*). Wskaźniki te służą do wyznaczania dwóch faz krytycznych tej samej rośliny. W przypadku zbóż RGR osiąga największe wartości w końcu fazy krzewienia (BBCH 28-29), a ACGR w fazie od początku ukazywania się jęczyczka liścia flagowego (BBCH 37) do końca kłoszenia (BBCH 59). W obu tych fazach krytycznych azot pełni określone funkcje plonotwórcze. W pierwszej – koniec fazy krzewienia – azot buduje potencjał plonowania (wpływa na wzrost liczby źdźbeł w roślinie i kłosek w kłosie), w drugiej, tj. od końca fazy strzelania w źdźbło do początku kłoszenia, kiedy ustala się rzeczywista struktura plonu ziarna, azot kontroluje tempo redukcji liczby kłosek w kłosie oraz płodnych kwiatków w kłosie. Z praktycznego punktu widzenia, o ile podanie azotu w pierwszym terminie (gdy wynik analizy chemicznej jest poniżej przedziału krytycznego) istotnie wpłynie na tworzenie elementów struktury plonu, o tyle w drugim tylko skoryguje wcześniej ustalony poziom plonowania (9).

Tabela 11

Przedziały krytyczne zawartości składników pokarmowych w suchej masie nadziemnej części roślin pszenicy ozimej w fazie strzelanie w źdźbło–liść flagowy (BBCH 35-37)

Makroelementy (% s.m.)					Mikroelementy (mg·kg ⁻¹)			
N	P	K	Ca	Mg	B	Mo	Cu	Mn
2,3–3,8	0,25–0,5	3,3–4,5	0,35–1,0	0,1–0,23	5–10	0,1–0,3	5–10	30–100

Źródło: Wach, 2015 (18)

Test NNI

Test NNI – indeks stanu odżywienia azotem (ang. *Nitrogen Nutrition Index*) stanowi uściślenie metody przedziałów krytycznych. Według Lemaira (14), podstawą tego testu jest założenie, że w rozwoju ontogenetycznym roślin istnieje ścisła zależność pomiędzy zawartością azotu i nagromadzoną suchą masą. Test NNI wyrażany jest jako iloraz aktualnej i krytycznej zawartości azotu w roślinach, przy określonym plonie ich suchej masy według następującego wzoru:

$$NNI = N_{akt} / N_{kryt},$$

gdzie:

N_{akt} – aktualna zawartość N w roślinie,

N_{kryt} – krytyczna zawartość N w roślinie.

Krytyczną zawartość N wylicza się ze wzoru:

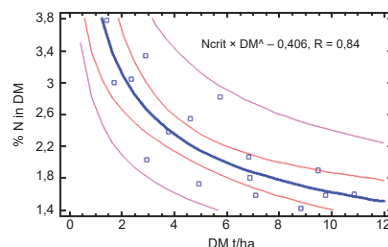
$$N_{kryt} = a(SM)^{-b}$$

gdzie:

N_{kryt} – zawartość azotu ogólnego w suchej masie roślin optymalnie odżywionych azotem,

SM – plon suchej masy (t·ha⁻¹),

a i b – współczynniki równania.



Równanie to zostało uznane za „krzywą rozcieńczenia azotu”. Za krytyczne zawartości azotu w suchej masie roślin przyjmowane są najmniejsze zawartości N ogólnego, które zapewniają maksymalne tempo wzrostu roślin. Krzywe rozcieńczenia azotu określono jak dotąd dla kilku roślin uprawnych (8). W Polsce zostały wyznaczone dla zbóż przez Fotymę i Pecio (5):

kukurydza: $a = 3,4$; $b = -0,37$ (wg Plenneta i Lemaire 1999, za Gastali Lemaire (8))

pszenica ozima: $a = 4,56$; $b = -0,483$

pszenżyto ozime: $a = 4,69$; $b = -0,518$

pszenica jara: $a = 4,31$; $b = -0,444$

jęczmień jary: $a = 3,501$; $b = -0,486$

Wartość ilorazu pomiędzy zawartością aktualną i krytyczną azotu bliska jedności świadczy o optymalnym odżywieniu roślin tym pierwiastkiem. Zawartość azotu w analizowanej próbce materiału roślinnego mniejsza od krytycznej (wartość $NNI < 1$) świadczy o niedostatecznym stanie odżywienia roślin tym składnikiem. Trzeba wówczas zastosować uzupełniającą dawkę azotu.

Interpretacja testu NNI nie jest związana z fazą rozwojową zbóż, ale próbka roślinna musi być pobrana w sposób ilościowy, ponieważ konieczne jest oznaczenie aktualnego plonu suchej masy. W celu oceny stanu odżywienia roślin azotem należy również oznaczyć aktualną zawartość azotu ogólnego, a także dysponować odpowiednią krzywą krytyczną.

W badaniach Fotymy i Bezduszniaka (4) wartości wskaźników NNI dla zbóż ozimych zwiększały się w miarę wzrostu dawek azotu, co było związane z poprawą stanu odżywienia roślin i zwiększaniem plonu ziarna (tab. 12). Wartości NNI dla pszenicy jarej również zwiększały się wraz ze wzrostem dawki azotu, ale po zastosowaniu dawki $125 \text{ kg N} \cdot \text{ha}^{-1}$ wartość wskaźnika przewyższała 1, co świadczy o nadmiernym odżywieniu roślin azotem, przy czym plon ziarna zwiększał się tylko do dawki $100 \text{ kg N} \cdot \text{ha}^{-1}$ i rośliny były optymalnie odżywione azotem – wartość $NNI = 1$.

Tabela 12

Średnie wartości wskaźnika NNI dla zbóż zależnie od dawki azotu

Dawka N ($\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$)	Pszenica ozima	Pszenżyto ozime	Żyto	Pszenica jara
0	0,58	0,51	0,52	0,58
25	0,65	0,64	0,65	0,64
50	0,78	0,68	0,73	0,79
75	0,87	0,79	0,81	0,92
100	0,96	0,84	0,89	1,00
125	1,01	0,90	0,98	1,11

Źródło: Fotyma i Bezduszniak, 2000 (4)

Metoda DRIS

Istotą metody DRIS (ang. *Diagnosis and Recommendation Integrated System*), czyli Zintegrowanego Systemu Diagnozy i Zaleceń, są relacje pomiędzy zawartością

poszczególnych pierwiastków występujących w roślinie. Procedura diagnostyczna składa się z dwóch etapów: obliczania indeksów oraz interpretacji uzyskanych norm DRIS. Indeksy DRIS są względną miarą niedoboru lub nadmiaru składników pokarmowych w badanej roślinie w stosunku do przyjętej normy. Normy DRIS są to stosunki składników pokarmowych dla populacji o wysokich plonach, uwzględniające gatunek i fazę rozwojową rośliny. Podaje się je w formie dwóch liczb: średniej arytmetycznej i współczynnika zmienności lub wariancji (tab. 13).

Tabela 13

Normy DRIS dla pszenicy i żyta w fazie strzelania w źdźbło

Parametry analizy roślin	pszenica ozima		żyto	
	średnia	wariancja	średnia	wariancja
N/P*	7,72	2,455	6,90	1,221
N/K	0,89	0,032	0,98	0,038
N/Ca	7,73	2,966	8,23	2,744
N/Mg	28,12	72,440	27,87	32,692
P/K	0,12	0,000	0,14	0,000
P/Ca	1,06	0,145	1,23	0,120
P/Mg	3,82	2,264	4,08	6,655
K/Ca	9,09	8,035	8,80	8,971
K/Mg	31,76	45,825	29,08	46,76
Ca/Mg	3,68	0,687	3,48	0,682

*jest to stosunek procentowy zawartości N w s.m. do procentowej zawartości P w s.m.

Źródło: Faber i in., 1988 (1)

Podstawowym założeniem metody DRIS jest odniesienie uzyskanych wyników, przedstawiających rzeczywiste relacje zachodzące między pierwiastkami, do ściśle zdefiniowanych stosunków w grupie wysokich plonów. Prowadzona ocena sprowadza się do poszukiwania pierwiastka lub pierwiastków, które z powodu niedoboru lub nadmiaru zakłócają stan równowagi żywieniowej rośliny. Metoda DRIS opiera się na założeniu, że suma indeksów z uwzględnieniem znaków zawsze równa się zeru. Duża (powyżej 15) wartość bezwzględna sumy indeksów świadczy o niezrównoważonym stanie odżywienia rośliny. Metoda ta pozwala również uszeregować indeksy od najmniejszych (ujemnych) do największych (dodatnich), co odpowiada uszeregowaniu pierwiastków od największego niedoboru do największego nadmiaru.

Metody pośrednie – polowe metody instrumentalne

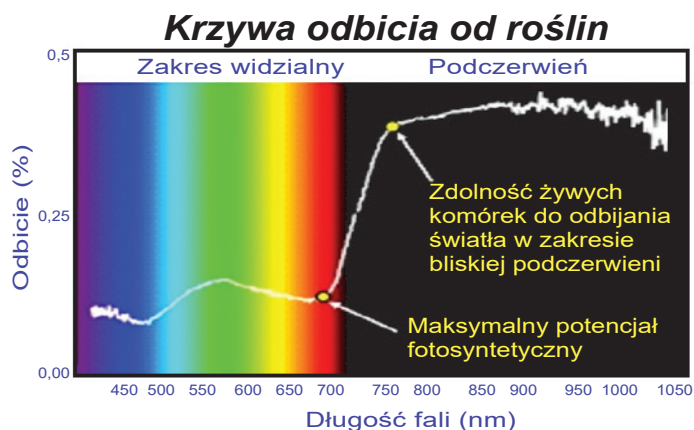
Dzięki postępowi technicznemu do oceny zawartości składników mineralnych (głównie azotu) w roślinach można zastosować aparaturę wykorzystującą zjawiska związane z charakterystyką światła (pochłanianie, odbicie). U podstaw funkcjonowania wskaźników wegetacji leżą właściwości występujących w każdej roślinie barwników asymilacyjnych (tab. 14).

Wybrane wskaźniki wegetacji i ich twórcy

Wskaźnik wegetacji	Twórca i rok wynalezienia
$RVI = R/NIR$	Jordan (1969)
$NDVI = (NIR - R)/(NIR + R)$	Rouse et al. (1974)
$PVI = (NRI - aR - b)/(1 + a^2)^{1/2}$	Richardson and Wiegand (1977)
$SAVI = (1 + L)(NIR - R)/(NIR + R + L)$	Huete (1988)
$MSAVI = (NIR + 1) - (1/2)[(2NIR + 1)^2 - 8(NIR - R)]^{1/2}$	Qi et al. (1994)

Źródło: Mikołowicz, 2008 (16)

Barwniki asymilacyjne absorbują promieniowanie elektromagnetyczne w zakresie od 400 do 700 nm. Zakres promieniowania biorący udział w fotosyntezie określa się jako PAR (ang. *Photosynthetically Active Radiation*). Każda zmiana zawartości barwników asymilacyjnych w roślinach oraz wody ma swoje przełożenie na wartości odbicia i absorpcji promieniowania elektromagnetycznego w poszczególnych długościach fal, co z kolei powoduje zmiany wartości wskaźników wegetacji. W zakresie widma odpowiadającego czerwieni odbicie promieniowania od roślin jest bardzo niskie, natomiast pochłanianie promieniowania – wysokie. Jest to spowodowane tym, że w zakresie promieniowania czerwonego swoje maksimum absorpcji ma chlorofil. Im większa jest zawartość chlorofilu, tym więcej promieniowania jest on w stanie pochłoniąć, co jednocześnie zmniejsza wartość odbicia promieniowania czerwonego od roślin. Wartość odbicia promieniowania czerwonego dla roślin będących w dobrej kondycji wynosi średnio około kilku procent. Każdy stres wpływający na roślinę i powodujący zmniejszenie zawartości, spadek aktywności chlorofilu lub uaktywnienie innych barwników asymilacyjnych powoduje wzrost odbicia promieniowania przy tej długości fali.



Rys. 3. Krzywa odbicia promieniowania słonecznego od roślin

Źródło: Mikołowicz, 2008 (16)

Zawartość chlorofilu w liściach roślin ma ścisły związek z zawartością azotu (20). Do metod wykorzystujących tę zależność należą testy SPAD i NDVI. Z praktycznego punktu widzenia istotną zaletą pomiarów NDVI i SPAD jest łatwość ich wykonania bez konieczności pobierania próbek roślinnych i przeprowadzania analiz chemicznych. Pomiary te są wykonywane bezpośrednio w polu.

Test SPAD

Test SPAD (ang. *Soil Plant Analysis Development*), tzw. indeks zieloności liścia albo zawartości chlorofilu, służy do oceny stanu odżywienia roślin azotem. Pomiary wykonuje się bezpośrednio w polu na liściach roślin bez potrzeby ich zrywania, przy użyciu instrumentu SPAD 502, nazywanego też chlorofilometrem lub N-testerem (rys. 4).



Rys. 4. N-tester SPAD 502

Źródło: Alicja Pecio

Test SPAD polega na pomiarze różnic pomiędzy ilością światła absorbowanego (o długości fali 650 nm) i przepuszczanego (o długości fali 940 nm) przez tkankę liścia. Iloraz tych różnic, zgodnie z poniższym wzorem, jest indeksem SPAD:

$$\text{SPAD} = (940 \text{ nm} - 650 \text{ nm}) / (650 \text{ nm} - 940 \text{ nm})$$

Obliczenia, na podstawie 30 prawidłowo wykonanych pomiarów, wykonuje wbudowany w N-tester mikroprocesor. Wynik wyświetlany na ekranie aparatu w jednostkach SPAD określa średnią zawartość chlorofilu w skali 0–800. Przy takim samym stanie odżywienia roślin azotem odczyty są charakterystyczne dla gatunków, a nawet odmian roślin uprawnych. Różnice wartości indeksu pomiędzy gatunkami roślin są uwarunkowane genetycznie.

W celu umożliwienia wykorzystywania testu do oceny stanu odżywienia roślin azotem, wyznaczono wartości krytyczne indeksu odpowiadające optymalnemu stanowi odżywienia tym składnikiem (tab. 15). Jeżeli zmierzone wartości SPAD są niższe od krytycznych, wskazane jest nawożenie uzupełniające. Test SPAD znalazł zastosowanie w korekcie nawożenia pogłównego roślin uprawnych azotem, szczególnie w fazie strzelania w źdźbło zbóż (BBCH 30-31).

Tabela 15

Wartości odczytów SPAD dla zbóż w zależności od dawek azotu

Dawka N (kg·ha ⁻¹)	Pszemica ozima		Pszemżyto		Żyto		Pszemica jara	
	SPAD	odch. st.	SPAD	odch. st.	SPAD	odch. st.	SPAD	odch. st.
0	369	40	473	98	462	15	364	10
25	443	25	480	70	474	28	405	39
50	486	16	500	70	500	21	450	26
75	532	14	555	49	521	18	474	37
100	545	14	585	42	529	21	500	34
125	560	14	600	42	560	16	510	29

Źródło: Fotyma i Bezdusznik, 2000 (4)

Test NDVI

Test NDVI (ang. *Normalized Difference Vegetation Index* – Znormalizowany Wskaźnik Wegetacji) jest podstawowym indeksem roślinnym stosowanym w tele-detekcji. Obliczany jest według wzoru:

$$NDVI = (NIR - R) / (NIR + R)$$

gdzie:

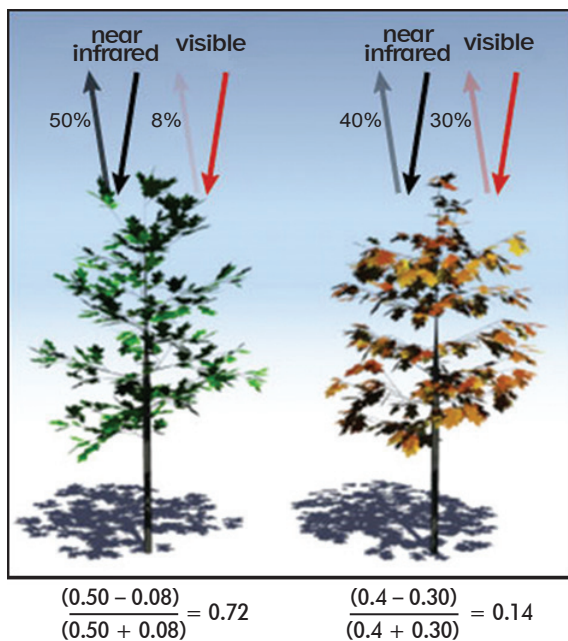
R – wartość odbicia promieniowania w paśmie czerwonym (widzialnym),

NIR – wartość odbicia promieniowania w bliskiej podczerwieni.

Wskaźnik NDVI przyjmuje wartości od -1 do 1, najczęściej waha się w przedziale od 0,4 do 0,9. Im większa jest różnica pomiędzy wartością odbicia promieniowania w paśmie czerwieni i odbicia promieniowania w podczerwieni, tym wyższe wartości przyjmuje wskaźnik NDVI. Na rysunku 5 przedstawiono zasadę tworzenia wskaźnika NDVI. Rośliny w dobrej kondycji (odżywione, bez działających na nie stresów) pochłaniają ponad 92% światła widzialnego, a odbijają 50% promieniowania podczerwonego (NDVI = 0,72). Gdy stan równowagi w roślinie zostaje zachwiany, np. na skutek działania niekorzystnych czynników, relacje te zmieniają się. Pochłanianie promieniowania widzialnego może zmniejszyć się do 70% i jednocześnie zmniejsza się do 40% ilość światła odbitego w zakresie bliskiej podczerwieni (NDVI = 0,14).

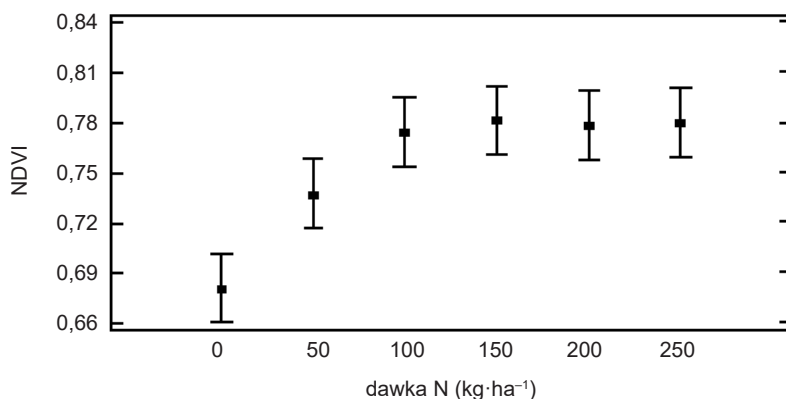
Test NDVI służy głównie do oceny stanu i kondycji łanu roślin, ale może być również używany do określenia stanu odżywienia azotem. Wyniki wielu badań mających na celu określenie relacji pomiędzy zawartością azotu w roślinach, zawartością

chlorofilu a charakterystyką promieniowania odbitego od roślin wykazały zależności pomiędzy nawożeniem azotem a charakterystyką spektralną roślin zbożowych (19, 21). Stwierdzono również istotny wpływ dawki N na zawartość chlorofilu w roślinach (20) oraz istotną zależność pomiędzy zawartością chlorofilu w roślinach a ich wskaźnikami wegetacji (17, 21) (rys. 6).



Rys. 5. Zasada tworzenia wskaźnika zieleni NDVI

Źródło: Mikołowicz, 2008 (16)



Rys. 6. Wpływ dawki N na wskaźnik NDVI kukurydzy mierzony instrumentem GreenSeeker

Źródło: Mikołowicz, 2008 (16)

Wskaźnik NDVI znalazł zastosowanie szczególnie w rolnictwie precyzyjnym. Urządzenia mierzące ten wskaźnik są montowane na ciągnikach i połączone z komputerem sterującym rozsiewaczem bądź opryskiwaczem. Pozwala to korygować dawkę nawozu lub środka ochrony roślin w trakcie zabiegu agrotechnicznego.

Przykładem urządzenia wykorzystywanego do pomiaru wskaźników wegetacji jest GreenSeeker, produkowany przez firmę NTech (rys. 7). Przyrząd emituje promieniowanie o długości fali 600 nm (czerwień) oraz 770 nm (bliska podczerwień). Detektor rejestruje promieniowanie odbite od roślin. Wartości te przeliczane są na wskaźniki zieleni i zapisywane w pamięci wewnętrznego komputera.



Rys. 7. GreenSeeker umieszczony na dachu ciągnika

Źródło: Alicja Pecio

Bilans składników nawozowych

W kolejnej z wymienionych metod określania potrzeb nawozowych roślin, tj. metodzie bilansowej, dawki nawozów oblicza się z różnicy pomiędzy przychodem i rozchodem składników pokarmowych. Bilans składników pokarmowych w układzie gleba – roślina jest podstawą systemu doradztwa nawozowego NAW. Po stronie rozchodu uwzględnia się pobranie składnika z plonem, natomiast po stronie przychodu – zasoby glebowe składników, ilość składników wnoszonych w nawozach organicznych, a w przypadku azotu, także wiązanie biologiczne oraz efekt azotu resztkowego (działanie następcze azotu z nawozów mineralnych zastosowanych pod przedplon). Mankamentem tej metody jest niemożność uwzględnienia w bilansie wszystkich źródeł przychodu (np. opad z atmosfery, wiązanie biologiczne, mineralizacja substancji organicznej etc.) oraz wszystkich rozchodów (straty w wyniku wymywania, spływu powierzchniowego, straty gazowe).

Bilans azotu

W bilansie azotu po stronie przychodów oprócz azotu z gleby (pobranie z plonem minimalnym) uwzględnia się także działanie nawozowe N z innych źródeł oraz azot pozostający w glebie po uprawie roślin bobowatych. Dawkę N_{\min} oblicza się według następującego wzoru:

$$\text{Dawka } N_{\min} = \text{plon osiągalny w gospodarstwie rolnym [t·ha}^{-1}] \times \text{pobranie jednostkowe azotu [kg N·t}^{-1}] - \sum N \text{ z innych źródeł} \times \text{równoważnik nawozowy} - \text{korekta dla roślin uprawianych po przedplonach lub międzyplonach bobowatych}/0,7 \text{ (współczynnik wykorzystania N z nawozów azotowych mineralnych) (15).}$$

Pobranie jednostkowe azotu dla wybranych roślin przedstawiono w tabeli 1.

Azot pochodzący z tych źródeł przelicza się na tzw. azot działający, to znaczy wykazujący takie samo działanie nawozowe jak azot z nawozów mineralnych. Do przeliczeń stosuje się prosty wzór:

$$N_D = N_{og} \times R$$

gdzie:

N_D – azot działający,

N_{og} – azot całkowity pochodzący z danego źródła,

R – równoważnik nawozowy azotu dla tego źródła.

Równoważnik nawozowy określa wartość 1 kg N z danego źródła w jednostkach azotu z nawozów mineralnych (tab. 16). Wartość równoważnika 0,5 oznacza na przykład, że 1 kg składnika z danego źródła (np. z nawozu organicznego) odpowiada działaniu 0,5 kg składnika w nawozie mineralnym. Równoważniki nawozowe azotu wyznaczono na podstawie wyników odpowiednio zaplanowanych doświadczeń polowych (10).

Tabela 16
Równoważniki nawozowe azotu z wybranych źródeł w zależności od terminu stosowania

Źródło azotu	Termin stosowania	
	jesień	wiosna
Obornik		
Bydło	0,35	0,40
Świnie	0,40	0,45
Gnojowica		
Bydło	0,50	0,60
Świnie	0,60	0,70
Gnojówka		
Bydło	0,55	0,75
Świnie	0,65	0,80

Źródło azotu	Termin stosowania	
	jesień	wiosna
Frakcja stała po separacji gnojowicy		
Bydło	0,20	0,25
Świnie	0,25	0,30
Frakcja ciekła po separacji gnojowicy		
Bydło	0,70	0,80
Świnie	0,75	0,85
Inne		
Produkt pofermentacyjny (frakcja płynna)	0,60	0,7
Produkt pofermentacyjny (frakcja stała)	0,30	0,4
Kompost i inne nawozy organiczne	0,30	
Azot mineralny z zasobów glebowych	0,9 ¹	0,6 ²

¹w uprawach roślin ozimych do nawożenia wiosną; ²w uprawach roślin jarych

Źródło: Rozporządzenie..., 2020 (15)

Tabela 17

Ilość azotu pozostającego działającego po uprawie roślin bobowatych

Rodzaj przedplonu	Bobowate w czystym siewie		Bobowate w mieszankach z trawami lub zbożami		Przyorane liście roślin korzeniowych
	plon główny	międzyplon	plon główny	międzyplon	
Przyorane resztki poźniwne	30 kg	15 kg	20 kg	10 kg	25 kg
Przyorane całe rośliny na zielony nawóz	łubin żółty – 74 kg groch – 77 kg seradela – 65 kg pozostałe – 60 kg	koniczyna czerw. – 30 kg koniczyna b. – 27 kg seradela – 33 kg pozostałe – 30 kg	50 kg	20 kg	-

Źródło: Rozporządzenie..., 2020 (15)

Saldo bilansu azotu, czyli różnica pomiędzy potrzebami pokarmowymi roślin a ilością składnika pobieraną z gleby i innych źródeł (przeliczona na azot działający), wyznacza potrzeby nawozowe na azot z nawozów mineralnych. Zalecana dawka nawozów azotowych powinna być wyższa niż wyliczone potrzeby nawozowe na N z nawozów mineralnych z uwagi na fakt, iż rośliny wykorzystują tylko część składnika dostarczonego w nawozach. Wynika to częściowo z rozbieżności pomiędzy terminem stosowania nawozów i tempem pobierania składników przez rośliny, przestrzennym rozmieszczeniem nawozów i systemu korzeniowego, a częściowo związane jest ze stratami azotu (wymywanie i straty gazowe). Dawkę nawozów azotowych obliczamy, mnożąc wyliczone potrzeby nawozowe na azot z nawozów mineralnych przez odwrotność współczynnika wykorzystania N z tych nawozów.

Bilans fosforu, potasu i magnezu

Potrzeby nawożenia P, K, Mg uwzględniają potrzeby pokarmowe roślin oraz zasobność gleby w przyswajalne formy składników. Na glebach o niskiej zawartości składników pobranie przez rośliny jest mniejsze niż zastosowana dawka nawozów, co wynika z immobilizacji części składników nawozowych i całkowite zapotrzebowanie nawozowe musi być zwiększone. Na glebach zasobnych pobranie przez rośliny może przewyższać ich dopływ w nawozach dzięki wykorzystaniu rezerw glebowych i całkowite potrzeby nawozowe mogą być odpowiednio zmniejszone. Na podstawie wyników doświadczeń wieloletnich wyznaczono optymalne wartości stosunku całkowitych potrzeb nawozowych do potrzeb pokarmowych roślin:

$$B = \text{całkowite potrzeby nawozowe/potrzeby pokarmowe}$$

Wartość B określana jest jako współczynnik bilansowy danego składnika. Wielkość tego współczynnika zależy od kategorii agronomicznej gleby i od zawartości w niej przyswajalnych form składników (8). Wartości współczynników bilansowych dla gleb ubogich w składniki pokarmowe przyjmują wartości większe od 1, dla gleb o optymalnej zawartości składników – wartości bliskie 1 i dla gleb zasobnych – wartości mniejsze od 1. Mnożąc całkowite potrzeby nawozowe roślin przez współczynnik bilansowy, oblicza się ostatecznie ilość składnika w nawozach mineralnych i organicznych, którą należy zastosować, aby uzyskać optymalny plon roślin. Od wyznaczonej w taki sposób całkowitej ilości składników odejmuje się ilość składników działających w nawozach organicznych. Działanie nawozów organicznych rozkłada się na okres dwóch lat. Ilość składników działających w kolejnych latach oblicza się jako iloczyn dawki nawozu organicznego, zawartości procentowej składnika i równoważnika nawozowego (10).

Wyliczone w ten sposób potrzeby nawozowe w odniesieniu do fosforu, potasu i magnezu z nawozów mineralnych odpowiadają zalecanej dawce tych nawozów. W przeciwieństwie do azotu nie uwzględnia się tutaj współczynnika wykorzystania P, K i Mg z nawozów mineralnych, gdyż został on pośrednio uwzględniony we współczynniku bilansowym.

Podsumowanie

W pracy przedstawiono teoretyczne podstawy wyznaczania potrzeb pokarmowych i potrzeb nawożenia roślin uprawnych. Potrzeby pokarmowe roślin to ilość składnika, jaką roślina musi pobrać, aby wydać osiągalny plon. Wyznaczane są jako iloczyn prognozowanego w danych warunkach plonu i wielkości pobrania składnika potrzebnego do wyprodukowania jednostki produktu. Potrzeby nawozowe określają ilość składników, jaką należy dostarczyć roślinom, aby mogły pokryć swoje potrzeby pokarmowe. Mogą one być częściowo zaspokojone z rezerw składników nagromadzonych w glebie, z nawozów organicznych lub z przyoranych pozostałości

przedplonu. Pozostałą część należy uzupełnić w nawozach mineralnych, których dawki można wyznaczyć z wykorzystaniem funkcji produkcji, na podstawie testów glebowych lub roślinnych oraz opierając się na bilansie składników nawozowych. Funkcja produkcji opisuje zależność pomiędzy plonem rośliny a zastosowaną dawką nawozu, z wykorzystaniem funkcji matematycznej i odpowiadającego jej wykresu. Wśród testów glebowych wiodącą pozycję zajmują testy chemiczne polegające na ekstrakcji i oznaczaniu zawartości tzw. przyswajalnych form składników mineralnych, które stanowią sumę składników w formie aktywnej i określonej ich ilości w formie ruchomej. Testy roślinne można podzielić na dwie grupy, tj. służące do bezpośredniej oceny stanu odżywienia roślin na podstawie analizy chemicznej materiału roślinnego (metoda przedziałów krytycznych, test NNI i metoda DRIS) oraz metody pośrednie, wykorzystujące zjawiska pochłaniania i odbicia światła, związane z występowaniem barwników roślinnych (testy SPAD i NDVI).

Literatura

1. Faber A., Filipiak K., Kryszkowska T.: Zalecenia nawozowe. Cz. III. Kontrola stanu odżywienia roślin metodą DRIS. IUNG, Puławy 1988, **P(37)**: 1-35.
2. Fotyma E.: Przydatność glebowego testu Nmin w nawożeniu zbóż ozimych. *Fragmenta Agronomica*, 1995, **3**: 59-78.
3. Fotyma E.: Zasady nawożenia azotem z wykorzystaniem testów glebowych i roślinnych. *Nawozy i Nawożenie – Fertilizers and Fertilization*, 2000, **3(4)**: 17-37.
4. Fotyma E., Bezdusznik D.: Wykorzystanie testu NNI i testu SPAD do oceny stanu odżywienia zbóż azotem. *Nawozy i Nawożenie – Fertilizers and Fertilization*, 2000, **4(5)**: 78-90.
5. Fotyma E., Pecio A. Zależność pomiędzy zawartością azotu a nagromadzeniem suchej masy przez zboża. *Pam. Puł.* 1999, 114: 93-100.
6. Fotyma E., Wilkos G., Pietruch C.: Test glebowy azotu mineralnego – możliwości praktycznego wykorzystania. *Mat. Szkol. IUNG, Puławy*, 1998, **69**: 1-48.
7. Fotyma M.: Przewidywalność składników pokarmowych dla roślin. W: *Chemiczne podstawy żywności gleb i nawożenia*, M. Fotyma, S. Mercik i A. Faber (red). PWRiL, Warszawa 1987, ss. 22-33.
8. Gastal F., Lemaire G.: N uptake and distribution in crop: an agronomical and ecophysiological perspective. *Journal of Experimental Botany*, 2002, **53**: 789-799.
9. Grzebiś W.: Nawożenie roślin uprawnych. PWRiL Poznań, 2008, **cz. 2**, ss. 131-141.
10. Jadczyzyn T.: Podstawy naukowe doradztwa nawozowego. *Nawozy i Nawożenie – Fertilizers and Fertilization*, 2000, **4(5)**: 185-205.
11. Jadczyzyn T., Kowalczyk J., Lipiński W.: Nawożenie mineralne na gruntach ornych i trwałych użytkach zielonych. Instrukcja upowszechnieniowa, IUNG-PIB, Puławy 2012, **184**: 1-24.
12. Kocón A.: Potrzeby pokarmowe roślin. *Studia i Raporty IUNG-PIB*, Puławy 2014, **37(11)**: 19-31.
13. Korzeniowska J., Stanisławska-Glubiak E., Jadczyzyn T., Lipiński W.: Nawożenie upraw rolniczych mikroelementami. Nowe liczby graniczne do oceny zawartości mikroelementów w glebie. Instrukcja upowszechnieniowa, IUNG-PIB, Puławy 2021, **249**: 1-28.
14. Lemaire G., Cruz P., Gosse G., Chartier M.: Study on the relationship between the nitrogen uptake dynamics of alfalfa (*Medicago sativa* L). *Agronomy (In French)*, 1995, **5**: 685-692.
15. Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 12 lutego 2020 r. poz. 243 w sprawie przyjęcia „Programu działań mających na celu zmniejszenie zanieczyszczenia wód azotanami pochodzącymi ze źródeł rolniczych oraz zapobieganie dalszemu zanieczyszczeniu”, (Dz.U., poz. 243, 2020).
16. Mikolowicz P.: Porównanie trzech metod oznaczania indeksu NDVI w łanie roślin. *Fragmenta Agronomica*, 2008, **2**: 93-107.

17. S i m s D. A., G a m o n J. A.: relationships between leaf pigment content and spectral reflectance across a wide range of species, leaf structures and development stages. *Remote Sensing of Environment*, 2002, **81**: 337-354.
 18. W a c h D.: Metody oceny stanu odżywienia roślin. *Studia i Raporty IUNG-PIB*, Puławy 2015, **42(16)**: 53-68.
 19. W a l b u r g G., B a u e r M. E., D a u g h t r y C. S. T., H o u s l e y T. L.: Effect of nitrogen nutrition on the growth, yield and reflectance characteristic of corn canopies. *Agronomy Journal*, 1982, **74**: 667-683.
 20. W o o d C. W., R e e v e r s D. W., H i m e l r i c k D. G.: Relationship between chlorophyll meter readings and leaf chlorophyll concentration, N status and crop yield: a Review. *Proc. Agron. Soc. New Zeland*, 1993, **23**: 1-9.
 21. Y o d e r B. J., P e t t i g r e w - C r o s b y R. E.: Predicting nitrogen and chlorophyll content and concentrations from reflectance spectra (400-2500 nm) at leaf and canopy scales. *Remote Sensing of Environment*, 1995, **53**: 199-211.
 22. Zalecenia nawozowe. Cz. I. Liczby graniczne do wyceny zawartości w glebach makro- i mikroelementów. Puławy 1990, Seria P, **44**: 26.
-

Adres do korespondencji:

prof. dr hab. Alicja Pecio
Zakład Żywienia Roślin i Nawożenia
IUNG-PIB
ul. Czartoryskich 8,
24-100 Puławy
tel. 81 4786 831
e-mail: alicja.pecio@iung.pulawy.pl

AUTOR	ORCID
Alicja Pecio	0000-0001-7780-8313