

Agnieszka Rutkowska

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

RACJONALNE I EFEKTYWNE NAWOŻENIE AZOTEM*

Słowa kluczowe: akumulacja azotu, potrzeby pokarmowe, nawożenie azotem, formy nawozów

Wstęp

W praktyce rolniczej optymalizacja wykorzystania azotu w systemie produkcji roślinnej sprowadza się do realizacji kilku podstawowych zadań. Pierwsze z nich to dobór gatunków, a nawet odmian roślin o dużym potencjale plonowania i zdolności do pobierania azotu z gleby. Kolejnym zadaniem jest przygotowanie stanowiska zapewniającego uprawianej roślinie sprawne pobieranie wody i składników pokarmowych oraz efektywną kontrolę stresów biotycznych i abiotycznych. Trzecim zadaniem jest racjonalne nawożenie azotem, tj. zastosowanie odpowiedniej dawki nawozu w optymalnym terminie, dostosowanym do dynamiki pobierania składnika oraz dobór odpowiedniej formy nawozu azotowego i sposobu jego aplikacji.

W porównaniu do innych składników mineralnych ważnych w żywieniu roślin azot jest pierwiastkiem bardzo ruchliwym, przez co narażony jest na straty z agrosystemów. W warunkach produkcyjnych stopień wykorzystania azotu z nawozów jest stosunkowo niewielki i waha się w szerokich granicach od 33 do 55%. Część azotu wprowadzona do gleby w nawozach ulega immobilizacji i może być wykorzystana przez rośliny w kolejnych sezonach wegetacyjnych. Formy rozpuszczalne w wodzie mogą przemieszczać się poza strefę systemu korzeniowego, stwarzając ryzyko rozpraszania azotu do środowiska wodnego. Szczególnie niebezpieczne są jony azotanowe, które migrując w okresie jesienno-zimowym w głąb profilu glebowego, przedostają się do wód gruntowych i powierzchniowych, pogarszając ich jakość i prowadząc do zakłócenia funkcjonowania ekosystemów.

Racjonalne nawożenie azotem powinno zatem realizować cel produkcyjny, jakim jest uzyskiwanie maksymalnych w danych warunkach siedliskowych plonów

* Opracowanie wykonano w ramach zadania 1.3 w programie wieloletnim IUNG-PIB.

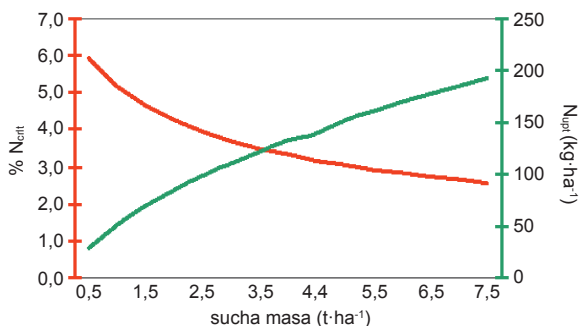
o wysokiej jakości oraz cel środowiskowy rozumiany jako ograniczanie strat azotu niewykorzystanego przez rośliny do wód gruntowych i atmosfery.

Pobieranie azotu i jego akumulacja w roślinach

Nadrzędna rola azotu w kształtowaniu plonu wynika z bezpośredniego związku tego pierwiastka z metabolizmem węgla zarówno w aspekcie procesów zachodzących na poziomie molekularnym, jak i fizjologicznym rośliny. W warunkach umiarkowanego niedoboru azotu roślina zwiększa transport związków węgla do korzeni, rozbudowując system korzeniowy, ale już w stanie optymalnego zaopatrzenia w azot inwestuje w organy odpowiedzialne za absorpcję dwutlenku węgla, głównie liście.

Czynnikiem zewnętrznym decydującym o pobieraniu jonów azotanowych jest ich stężenie w roztworze glebowym, w bezpośrednim sąsiedztwie korzeni. Do czynników wewnętrznych należy zaliczyć aktywność metaboliczną rośliny oraz stosunek masy nadziemnej do korzeni. Pobieranie i przemieszczanie związków azotu w każdej roślinie można wyjaśnić na gruncie koncepcji „sink – source” (12, 14). Zgodnie z tą koncepcją w roślinie istnieją miejsca stanowiące źródło związków mineralnych i organicznych, tzw. „source” oraz miejsce ich gromadzenia czyli „sink”. Te pierwsze to organy, w których zachodzi proces fotosyntezy, głównie blaszki liściowe, międzywęzła czy kłosa oraz korzenie jako organy pobierające składniki mineralne z gleby. Organy, do których przemieszczane są składniki mineralne z gleby określa się jako „sink”. W okresie intensywnego wzrostu każdy nadziemny, rozwijający się organ stanowi początkowo „sink” dla pobranego z gleby za pośrednictwem korzeni azotu (1). Przy deficycie składnika roślina znacznie zmniejsza powierzchnię asymilacyjną, chroniąc tym samym wcześniej wytworzone organy przed niedoborem azotu (3, 19).

Rośliny rosnące w warunkach dostatecznego zaopatrzenia w azot reprezentują model akumulacji zgodny z „krzywą wysycenia”. W modelu tym maksymalne tempo pobierania azotu (I_{\max} – maximum uptake rate) zmniejsza się wraz z wiekiem rośliny (9, 17), przy czym zachodzi ścisła korelacja pomiędzy I_{\max} a względną szybkością wzrostu (RGR – relative growth rate) (rys. 1).



Rys. 1. Model nagromadzenia suchej masy oraz azotu przez rośliny

Źródło: Lemaire i Gastal, 1997 (9)

Klasyczny model pobierania azotu występuje u zbóż, które akumulują 60–80% potrzebnego składnika w okresie wzrostu wegetatywnego, natomiast podczas nalewania ziarna dochodzi do jego remobilizacji z organów wegetatywnych. Ponieważ w tym czasie maleje aktywność systemu korzeniowego, intensywność pobierania azotu z gleby jest niewielka (13). Niektórzy autorzy utrzymują nawet, że zasoby azotu zakumulowanego przez zboża w częściach wegetatywnych w całości pokrywają potrzeby pokarmowe rozwijającego się ziarna (2, 11). W okresie intensywnego wzrostu i rozwoju organów wegetatywnych zbóż aktywność reduktazy azotanowej jest bardzo duża, a stężenie azotanów w soku ksylemowym wysokie (19). Przy dużym stężeniu azotanów w glebie, pomimo wysokiej aktywności enzymu proces redukcji nie nadąża za pobieraniem jonów, w związku z czym młode rośliny mogą gromadzić znaczną ilość azotanów. U pszenicy ozimej w fazie DC 25-26 (pęd główny i 5–6 pędów bocznych) zawartość azotu w całej masie nadziemnej może dochodzić nawet do 6%, z czego znaczną część stanowi azot w formie azotanowej. W miarę upływu czasu zdolność korzeni do pobierania azotanów zmniejsza się, co wynika ze zmieniającego się zapotrzebowania na azot, a intensywność pobierania jonów zależy w dużej mierze od stosunku masy części nadziemnych do korzeni (16). Począwszy od fazy kłoszenia u zbóż zaczyna się proces remobilizacji związków azotowych w nadziemnych częściach zbóż i przemieszczania ich do tworzącego się ziarna.

W stanowiskach naturalnie ubogich w azot nawet przy stosunkowo wysokich dawkach nawozów azotowych nie funkcjonuje model „wysycenia”, ponieważ niewystarczające odżywienie potasem powoduje, że azot mineralny nie jest pobierany z dostateczną szybkością w fazie krytycznej dla szybkości nagromadzania biomasy. W takich stanowiskach dynamika pobierania azotu przebiega zgodnie z modelem liniowym, określanym jako ciągły bądź „pełzający”. Niektóre gatunki, czy nawet odmiany roślin uprawnych akumulują azot przez cały okres wegetacji. Taki właśnie model pobierania składnika reprezentują rośliny motylkowate uprawiane na nasiona, które korzystają z dwóch źródeł azotu: remobilizowanego z organów wegetatywnych oraz pobieranego z gleby. Według modelu ciągłego przebiega również akumulacja azotu przez modyfikowane genetycznie odmiany kukurydzy typu stay – green.

Krytyczne fazy zapotrzebowania roślin na azot

Jak wspomniano w poprzedniej części pracy, u większości roślin zapotrzebowanie na azot jest największe w początkowym okresie wegetacji, w tzw. liniowej fazie wzrostu i zmniejsza się wraz z wiekiem rośliny. Niemniej jednak dynamika akumulacji azotu w okresie wegetacji zależy od gatunku rośliny. Podczas wzrostu i rozwoju każdego gatunku roślin uprawnych występują okresy największego zapotrzebowania na azot, a niedostateczne zaopatrzenie w ten składnik wpływa negatywnie na wielkość plonu końcowego. Fazy największego zapotrzebowania na azot określane są jako krytyczne stadia rozwojowe bądź też fazy największej wrażliwości rośliny na niedobory azotu.

Z tego względu terminy stosowania nawozów azotowych powinny być tak dobrane, aby kształtować trzy główne okresy tworzenia plonu użytkowego:

- 1) tworzenie pierwotnych podstaw struktury plonu, kiedy to pobieranie azotu z gleby jest kontrolowane przez fosfor, magnez, potas oraz mangan i cynk;
- 2) kształtowanie elementów struktury plonu, przypadające na okres liniowej fazy wzrostu, podczas którego szybkość wzrostu, a w konsekwencji wielkość biomasy determinuje stan odżywienia roślin azotem, potasem, magnezem oraz chlorem, miedzią i siarką;
- 3) kwitnienie i dojrzewanie, gdy pierwiastkami krytycznymi dla roślin są: azot, fosfor, magnez, żelazo, siarka, cynk oraz miedź.

Szczegółowe wydzielanie faz krytycznych powinno odnosić się zawsze do uprawianego gatunku, ponieważ niektóre rośliny wykazują silną reakcję na niedobór określonego składnika, np. kukurydza na niedobór cynku, a burak cukrowy na niedobór boru. Fazy krytyczne ujawniają się w każdym okresie tworzenia plonu, dlatego należy pamiętać, aby nawóz azotowy stosować z dostatecznym wyprzedzeniem, a ilość składnika powinna wynikać z potrzeb pokarmowych roślin w stosunku do azotu w danej fazie rozwojowej. Krytyczne stadia rozwojowe wybranych gatunków roślin uprawnych zebrano w tabeli 1.

Tabela 1

Fazy krytyczne – okresy największej wrażliwości roślin uprawnych na odżywienie azotem

Roślina	Fazy krytyczne	Fazy w skali BBCH
Zboża	1) krzewienie 2) początek strzelania w źdźbło 3) koniec strzelania w źdźbło	25-29 31-32 37-51
Rzepak	1) pełnia budowy rozety/początek wzrostu wydłużeniowego 2) pąkowanie	30-31 50-51
Ziemniak	1) 20-30% zakrytych międzyrzędzi 2) początek tworzenia bulw	32-33 40-41
Burak cukrowy	1) 2-3 para liści 2) 60 dni od wschodów; początek lipca	14-15 41-43
Strączkowe, groch	1) początek wzrostu wydłużeniowego 2) początek kwitnienia	30-31 61-62

Źródło: Grzebisz, 2008 (6)

Teoretyczne podstawy obliczania dawki azotu

Podstawowym kryterium wyznaczania dawki azotu jest zaklasyfikowanie rośliny do grupy roślin jarych bądź ozimych. Od tej klasyfikacji zależy zarówno sposób wyznaczenia całkowitej dawki azotu, jak i jej podział na dawki częściowe oraz dobór formy nawozów azotowych. Niezależnie od tego, całkowitą dawkę nawozów należy dzielić na dawki cząstkowe dostosowane do tempa nagromadzenia azotu i tworzenia

biomasy przez rośliny, co gwarantuje zabezpieczenie ich potrzeb pokarmowych na każdym etapie wzrostu i rozwoju oraz ogranicza straty składnika do środowiska.

Optymalna dawka azotu, jaką należy zastosować w uprawie poszczególnych gatunków roślin uprawnych powinna być z jednej strony dawką maksymalną, aby zapewnić pełną realizację potencjału plonotwórczego w danych warunkach środowiska, z drugiej strony – dawką minimalną, w trosce o bezpieczeństwo środowiska przyrodniczego. Przy ustalaniu całkowitej dawki nawozów azotowych należy brać pod uwagę następujące czynniki:

- zapotrzebowanie roślin na azot,
- zawartość azotu mineralnego w glebie bezpośrednio przed ruszeniem wegetacji,
- ilość azotu uwolnionego z zasobów glebowych w czasie wegetacji uprawianej rośliny,
- wykorzystanie azotu z nawozu przez uprawianą roślinę.

Potrzeby pokarmowe roślin oblicza się z algorytmu, którego elementami składowymi są oczekiwany plon użytkowy wraz z odpowiadającym mu plonem ubocznym oraz zapotrzebowanie jednostkowe na azot:

$$U_N = P \cdot N_j,$$

gdzie:

U_N – potrzeby pokarmowe roślin ($\text{kg N} \cdot \text{ha}^{-1}$),

P – plon użytkowy ($\text{t} \cdot \text{ha}^{-1}$),

N_j – pobranie jednostkowe ($\text{kg N} \cdot \text{t}^{-1}$) składnika z plonem głównym (użytkowym) wraz z odpowiednią ilością plonu ubocznego.

Klasyczną metodą ustalania potrzeb nawożenia jest metoda bilansowa, w której porównuje się rozchody składników pokarmowych (wynoszenie składników z plonami, straty w glebie) z przychodami (nawozy naturalne i organiczne, resztki poźniwne, opad atmosferyczny). W metodzie bilansowej potrzeby nawozowe roślin uprawnych, czyli całkowitą dawkę nawozów mineralnych oblicza się z różnicy potrzeb pokarmowych i ilości azotu, jaką rośliny mogą pobrać z gleby zgodnie ze wzorem:

$$N_{\text{opt}} = (N_{\text{pok}} - N_{\text{gleb}}) / WW_N$$

gdzie:

N_{opt} – całkowita dawka nawozów mineralnych,

N_{pok} – potrzeby pokarmowe roślin,

N_{gleb} – ilość azotu dostępnego z gleby,

WW_N – współczynnik wykorzystania azotu z nawozów.

O ile potrzeby pokarmowe, które stanowią iloczyn oczekiwanego plonu i jednostkowego pobrania składnika są stosunkowo łatwe do ustalenia, to praktycznie niemożliwa do dokładnego oszacowania jest ilość azotu, jaką rośliny mogą pobrać z gleby. Pojęcie azotu glebowego należy rozumieć szeroko jako ilość składnika ulegającego mineralizacji glebowej substancji organicznej, w tym resztek poźniw-

nych roślin przedplonowych, niewykorzystanego przez przedplon azotu z nawozów mineralnych i azotu z opadu atmosferycznego (7). Tylko część azotu pozostającego w glebie można określić za pomocą testu N_{\min} . Wyceny następczego działania azotu z nawozów mineralnych dokonuje się za pomocą tzw. równoważników azotowych. Równoważniki te wyznaczono na podstawie ścisłych doświadczeń polowych, w których plony roślin uzyskane wyłącznie w wyniku działania następczego azotu stosowanego pod przedplon porównywano z plonami roślin otrzymanymi przy zróżnicowanych dawkach azotu pochodzącego z nawozów mineralnych.

Równoważnik azotowy odpowiada ilości azotu w nawozach mineralnych stosowanych bezpośrednio pod roślinę, która równoważy działanie jednego kilograma azotu zastosowanego pod przedplon. Dla przykładu – wartość równoważnika azotowego równa 0,3 oznacza, że działanie 1 kg azotu zastosowanego pod przedplon można zrównoważyć, stosując 0,3 kg azotu bezpośrednio pod roślinę uprawną. Wartości równoważników azotowych stosowanych pod przedplon dla roślin jarych i ozimych, zależnie od ilości opadów w okresie jesienno-zimowym przedstawiono w tabeli 2. Wartości równoważników są wyższe dla roślin ozimych niż jarych, co wynika z dłuższego okresu wegetacji ozimin. Rośliny te zaczynają pobierać azot z gleby wkrótce po zbiorze przedplonu. W okresie jesienno-zimowym część azotu ulega stratom poprzez wymycie poza zasięg systemu korzeniowego roślin jarych, stąd równoważnik azotowy osiąga dla nich niższe wartości.

Tabela 2

Równoważniki azotowe nawozów mineralnych stosowanych pod przedplon

Ilość opadów atmosferycznych od listopada do marca	Równoważnik azotu dla roślin następczych	
	rośliny ozime	rośliny jare
Poniżej normy	0,30	0,25
W normie	0,26	0,17
Powyżej normy	0,20	0,05

Źródło: Jadczyzyn, 2002 (7)

Należy pamiętać, że nawozy azotowe nie są wykorzystywane przez rośliny uprawne w całości. Wynika to częściowo z rozbieżności między terminem stosowania nawozów i tempem nagromadzania składnika przez rośliny, przestrzennym rozmieszczeniem nawozów i systemu korzeniowego, jak również wymywania i immobilizacji azotu w glebie. Z tego względu przy wyznaczaniu optymalnej dawki nawozów azotowych należy uwzględnić współczynnik wykorzystania azotu z nawozów. Jest on uwarunkowany różnymi czynnikami, m.in. fazą rozwojową rośliny, przebiegiem pogody czy ilością wnoszonego w nawozach składnika. Azot z mniejszych dawek wykorzystywany jest z reguły w większym stopniu (5, 20). W uprawie pszenicy ozimej przy stosowaniu kilku małych dawek nawozów azotowych, dostosowanych do tempa nagromadzania azotu i tworzenia biomasy, wartość współczynnika wykorzystania azotu przez rośliny może przekraczać nawet 90% (17).

Wartości współczynników wykorzystania azotu z nawozów przez wybrane gatunki roślin uprawnych przedstawiono w tabeli 3.

Tabela 3

Współczynniki wykorzystania azotu z nawozów mineralnych przez wybrane gatunki roślin

Roślina	Współczynnik	Roślina	Współczynnik
Pszennica ozima	0,70	Burak cukrowy	0,92
Pszennica jara	0,73	Burak pastewny	0,75
Jęczmień jary	0,75	Ziemiak przemysłowy	0,51
Rzepak ozimy	0,55	-	-

Źródło: Jadczyzyn, 2002 (7)

Ważnym źródłem azotu dla roślin są nawozy naturalne, tj. obornik, gnojówka i gnojowica. Azot pochodzący z obornika uwalniany jest stopniowo w procesie mineralizacji substancji organicznej, przy czym dynamika tego procesu zależy w dużej mierze od stosunku węgla do azotu w nawozie oraz warunków glebowo-klimatycznych. Tempo uwalniania azotu z obornika nie jest w pełni zbieżne z fazami największego zapotrzebowania roślin na ten składnik, dlatego część azotu ulega stratom, a część zostaje trwale wbudowana w substancję organiczną gleby. Azot z gnojówki i gnojowicy jest znacznie łatwiej dostępny dla roślin aniżeli azot z obornika, ale narażony jest na duże straty gazowe zarówno podczas przechowywania, jak również w czasie aplikacji. Gnojówka i gnojowica są nawozami szybko działającymi, w znacznym stopniu zbliżonymi pod tym względem do nawozów naturalnych. Azot zawarty w nawozach naturalnych, bezpośrednio dostępny dla roślin, określany jest jako tzw. „azot działający”. Ilość azotu działającego wyznacza się z iloczynu zawartości tego składnika w nawozie i wartości równoważnika nawozowego. Równoważnik nawozowy jest wartością ustaloną eksperymentalnie i odpowiada ilości składnika wnoszonego do gleby w nawozach mineralnych, która wykazuje takie samo działanie nawozowe, jak jeden kilogram składnika w formie całkowitej w nawozach naturalnych. Wartości równoważników nawozowych dla azotu w poszczególnych nawozach naturalnych zestawiono w tabeli 4.

Tabela 4

Równoważniki nawozowe dla azotu nawozów naturalnych zależnie od terminu aplikacji

Rodzaj nawozu	Równoważnik nawozowy dla azotu	
	wiosna	jesień
Obornik w pierwszym roku po zastosowaniu	0,30	0,30
Gnojówka stosowana wiosną	0,50	0,70
Gnojowica stosowana wiosną	0,50	0,60

Źródło: Maćkowiak, 1994 (10)

Dla przykładu, wartość równoważnika nawozowego dla azotu obornika wynosi 0,30, co oznacza, że 1 kilogram w tym nawozie wykazuje takie samo działanie, jak 0,3 kg azotu w nawozach mineralnych.

Ze względu na opisane wyżej trudności wyznaczania całkowitej dawki azotu na podstawie metody bilansowej w praktyce doradztwo nawozowe oparte jest w dużej mierze na funkcjach produkcji i wyliczaną z nich efektywność nawożenia oraz wspomniane już współczynniki wykorzystania azotu z nawozów. Funkcja produkcji jest to funkcja matematyczna opisująca zależność pomiędzy wielkością lub wartością produkcji i wielkością badanego czynnika produkcji (4, 17). Za kryteria doboru odpowiedniego modelu przyjmuje się m.in. najlepszą zgodność plonów rzeczywistych uzyskanych doświadczalnie z plonami odtworzonymi z równania funkcji.

Zalecane dawki nawozów azotowych w zależności od przewidywanej wielkości plonu, wyznaczone na podstawie funkcji produkcji, zestawiono w tabeli 5.

Tabela 5

Zalecane dawki nawozów mineralnych (kg N · ha⁻¹) zależnie od prognozowanego plonu

Roślina	Plon	Dawka N	Roślina	Plon	Dawka N
Pszenica ozima	6	100	Ziemniak późny na oborniku (30 t · ha ⁻¹)	30	50
	8	120		35	70
	9	140		40	90
	10	160		45	100
Jęczmień jary	6	80	Ziemniak późny bez obornika	25	65
	7	100		30	85
	8	120		35	105
Żyto			Ziemniak wczesny na oborniku (30 t · ha ⁻¹)	40	80
				25	40
				30	50
				35	60
Pszennyto			Ziemniak wczesny bez obornika	40	70
				20	30
				25	50
				30	70
Owies			Burak cukrowy na oborniku (30 t · ha ⁻¹)	35	85
				40	80
				50	90
				60	100
Mieszanki zbożowe na ziarno			Burak pastewny na oborniku (30 t · ha ⁻¹)	70	120
				40	80
				50	100
				60	120
				70	150
				80	180

cd. tab. 5

Roślina	Plon	Dawka N	Roślina	Plon	Dawka N
Kukurydza na ziarno	5	80	Koniczyna z trawami	30	40
	7	130		40	60
	9	180		50	80
	10	200			
Kukurydza na zieloną masę	50	140	Owies na zieloną masę	30	50
	60	160		35	60
	80	190		40	70
	100	220			
Rzepak	2,5	100	Żyto na zieloną masę	30	50
	3,5	120		35	60
	4,5	160		40	70
	5	200			
Mieszanki zbożowo-strączkowe na ziarno	2,5	30	Bobik	3	20
	3,5	40		4	20
	4,5	60		5	20
Lucerna z trawami	30	40	Groch	2,5	20
	40	60		3	20
	50	85		3,5	20

Źródło: Jadczyzyn i in., 2013 (8)

Terminy stosowania nawozów azotowych

W grupie roślin ozimych wielkość podstawowej (pierwszej) dawki azotu zależy od czynników glebowych, pogodowych i agrotechnicznych oraz stanu morfologicznego ładu wczesną wiosną. W uprawie zbóż ozimych należy stosować system trzydawkowy, tak aby pierwsza dawka azotu pokryła zapotrzebowanie roślin w stosunku do azotu do fazy strzelania w źdźbło (stadium pierwszego lub drugiego kolanka). Podział całkowitej zaplanowanej dawki nawozów azotowych na dawki cząstkowe jest szczególnie ważny w przypadku uprawy jakościowych odmian pszenic ozimych. W uprawie tych odmian zaleca się następujący podział:

- przy dawkach do $100 \text{ kg N} \cdot \text{ha}^{-1}$: 40–60% w okresie ruszenia wegetacji, resztę w fazie strzelania w źdźbło;
- przy dawkach większych niż $100 \text{ kg N} \cdot \text{ha}^{-1}$: 40–50 $\text{kg N} \cdot \text{ha}^{-1}$ w okresie ruszenia wegetacji, pozostałe 30–35% w fazie strzelania w źdźbło i 20–25% na krótko przed kłoszeniem lub na początku tej fazy (15).

W regionach o dużej częstotliwości występowania susz zaleca się stosować system dwudawkowy, przy czym pierwsza dawka powinna stanowić około 60–70% całkowitej zaplanowanej dawki nawozów.

Analogicznie należy postępować w przypadku rzepaku oraz zbóż paszowych. Wyznaczona w tym systemie dawka nawozów powinna pokryć potrzeby pokarmowe zbóż do stadium rozwiniętego liścia flagowego, a w przypadku rzepaku do połowy fazy wzrostu wydłużeniowego.

Ustalenie dawki nawozowej azotowej pod zboża jare jest łatwiejsze. Całkowitą dawkę azotu w uprawie tej grupy roślin dzieli się na dwie części, w stosunku 60:40. Pierwszą dawkę należy zastosować przed siewem i dobrze wymieszać z glebą. Druga dawka powinna być aplikowana w okresie od pełni krzewienia do fazy ukazania się liścia flagowego. W przypadku małych dawek, poniżej $70 \text{ kg N} \cdot \text{ha}^{-1}$, całą dawkę nawozów azotowych należy zastosować przed siewem. Terminy stosowania mineralnych nawozów azotowych z podziałem na dawki cząstkowe pod poszczególne rośliny uprawy polowej zestawiono w tabeli 6.

Tabela 6

Terminy stosowania nawozów azotowych pod wybrane gatunki roślin uprawnych

Roślina	I dawka	II dawka	III dawka
Zboża ozime	przed ruszeniem wegetacji wiosną	faza strzelania w źdźbło	początek kłoszenia
Zboża jare	przed siewem	faza strzelania w źdźbło	początek kłoszenia
Kukurydza	przed siewem	do wysokości roślin ok. 30 cm	-
Ziemniaki średnio późne i późne	przed sadzeniem	początek wschodów	-
Buraki	przed siewem	po przerywce lub w fazie 4-6 liści	-
Rzepak	przed ruszeniem wegetacji wiosną	faza rozety	początek pąkowania
Trawy, motylkowate i ich mieszanki w roku siewu	przed siewem	po I pokosie	
Trawy, motylkowate i ich mieszanki w latach pełnego użytkowania	przed ruszeniem wegetacji wiosną	po I pokosie	po II pokosie

Źródło: Jadczyzyn i in., 2013 (8)

Podane w powyższej tabeli dawki nawozów odnoszą się do roślin uprawianych w dobrym stanowisku, w warunkach sprzyjających wysokiej efektywności azotu z nawozów oraz innych źródeł. Poza wyjątkiem ziemniaków i buraków uprawianych na oborniku, nie uwzględniono również stosowania nawozów naturalnych. Zalecane dawki nawozów azotowych można zmniejszyć odpowiednio po zastosowaniu: obornika – o $15 \text{ kg} \cdot \text{N} \cdot \text{ha}^{-1}$, gnojowicy bydłowej – o $17 \text{ kg} \cdot \text{N} \cdot \text{ha}^{-1}$, gnojowicy świńskiej – o $20 \text{ kg} \cdot \text{N} \cdot \text{ha}^{-1}$, gnojówki – o $20 \text{ kg} \cdot \text{N} \cdot \text{ha}^{-1}$.

Korygowanie pierwszej dawki azotu w oparciu o wyniki testu N_{\min}

Test azotu mineralnego, zwany testem N_{\min} , pozwala na bezpośrednie dokonanie pomiaru zawartości form $\text{NO}_3^- - \text{N}$ i $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ w warstwie gleby, w której rozmieszczona jest główna masa korzeni. Analiza chemiczna dokonywana jest w świeżym materiale glebowym. Podstawowym wymogiem wyznaczania dawki azotu metodą N_{\min} jest oznaczenie jego zawartości wczesną wiosną, tuż przed ruszeniem wegetacji, zaraz po ustąpieniu zmarzliny. Próbkę należy pobrać w terminie zgodnym z zaleceniami laboratorium agrochemicznego, tak aby analiza została wykonana w świeżym materiale, nie dłużej niż 24 godziny po pobraniu próbek gleby. Dla celów doradztwa nawozowego próbki gleby pobiera się do głębokości 60 cm, ponieważ w tych warstwach rozmieszczona jest główna masa korzeni. Wynik testu, wyrażony w $\text{kg N} \cdot \text{ha}^{-1}$, odnoszony jest bezpośrednio do potrzeb pokarmowych roślin. W celu uściślenia wielkości pierwszej dawki azotu wykorzystuje się tzw. „przeciętną” zawartość azotu mineralnego w glebie. Przeciętne zawartości azotu mineralnego w glebach w okresie wiosennym, na podstawie których koryguje się wielkość wiosennej dawki nawozów, wyznaczone na podstawie badań monitoringowych w Polsce, zestawiono w tabeli 7.

Tabela 7

Zawartość azotu mineralnego w glebie wczesną wiosną zależnie od kategorii agronomicznej

Kategoria agronomiczna gleby	Zawartość N_{\min}				
	bardzo niska	niska	średnia	wysoka	bardzo wysoka
Bardzo lekka	do 30	31-50	51-70	71-90	> 90
Lekka	do 40	41-60	61-80	81-100	> 100
Średnia i ciężka	do 50	51-70	71-90	91-100	> 100

Źródło: Jadczyzyn i in., 2013 (8)

Jeżeli wynik testu N_{\min} wskazuje na wysoką lub bardzo wysoką zawartość azotu mineralnego w profilu gleby do głębokości 60 cm, planowaną dawkę nawozów można zmniejszyć o różnicę pomiędzy zawartością N_{\min} w glebie pobranej z pola i górną granicą zawartości średniej.

W przypadku, kiedy w glebie stwierdzono bardzo niską lub niską zawartość azotu, planowaną dawkę N należy zwiększyć o różnicę pomiędzy dolną granicą zawartości średniej dla danej gleby i oznaczoną zawartością N_{\min} .

Planowana dawka azotu nie wymaga korekty, jeżeli wynik testu mieści się w przedziale zawartości średnich dla danej kategorii agronomicznej gleby.

Dobór formy nawozów azotowych

Właściwie dobrana forma nawozu azotowego, dopasowana do terminu jego aplikacji, gwarantuje większą skuteczność jego działania, minimalizuje straty gazowe oraz ogranicza wymywanie azotanów do wód gruntowych.

Nawozy azotowe zawierające azot wyłącznie w formie amonowej, np. siarczan amonowy, są sorbowane w glebie i nie ulegają wymywaniu, stanowiąc źródło azotu dla roślin przez dłuższy czas. Są to typowe nawozy przedsiewne i mogą być stosowane jednorazowo nawet w wyższych dawkach. Ten sposób aplikacji zalecany jest na glebach ciężkich jesienią i wczesną wiosną, gdy procesy nityfikacji przebiegają bardzo powoli lub nie zachodzą w ogóle. W takich warunkach nie ma obawy, że azot amonowy zostanie szybko przekształcony do łatwo wymywanej formy azotanowej. Nawozy amonowe należy natychmiast po zastosowaniu wymieszać z glebą w celu uniknięcia strat azotu na skutek ulatniania się amoniaku. Ponadto wymieszanie z glebą umożliwia umieszczenie nawozu w warstwie gleby, w której będzie rozmieszczona masa korzeni. Nawozy amonowe najbardziej zakwaszają glebę, dlatego nie należy ich stosować pod rośliny wrażliwe na niskie pH, np. jęczmień, burak czy rzepak oraz na glebach lekkich. Stanowią natomiast dobry nawóz pod ziemniaka i kukurydzę, jak również pod żyto, owies, rośliny poplonowe.

Nawozy saletrzone zawierające azot wyłącznie w formie saletrzanej np. saletra wapniowa, są nawozami szybko działającymi, nieulegającymi sorpcji wymiennej w glebie. Należy je stosować wyłącznie pogłównie. Nawozy te nieznacznie odkwaszają glebę, jednak ze względu na wysokie koszty nie są powszechne w praktyce rolniczej.

Najczęściej stosowane są nawozy saletrzano-amonowe, np. saletra amonowa czy saletrzaki. Saletra amonowa jest najpopularniejszym nawozem jednoskładnikowym, łatwo rozpuszczalnym w wodzie, działa szybko, dostarczając roślinom azot w dwóch formach. Forma azotanowa działa szybko, forma amonowa jest zatrzymywana przez kompleks sorpcyjny i udostępniana roślinom w dłuższym okresie po wysiewie, dlatego nawóz ten przeznaczony jest zarówno do stosowania przedsiewnego, jak i pogłównego. Nawozem uniwersalnym jest również saletrzak, szczególnie zalecany na gleby kwaśne i ubogie w magnez oraz w uprawie takich roślin, jak zboża jare, buraki cukrowe oraz pastewne oraz do pogłównego nawożenia na glebach lekkich i zakwaszonych. Przedsiewnie nawozy saletrzano-amonowe należy stosować na krótko przed siewem roślin, natomiast pogłównie – wiosną, pod oziminy i rośliny jare. Saletra amonowa nieznacznie zakwasza glebę, saletrzaki są neutralne dla odczynu gleby.

Mocznik jest nawozem uniwersalnym zawierającym 46% azotu w formie amidowej, która w glebie przechodzi w dostępną dla roślin formę amonową, a następnie azotanową. Dzięki temu azot z mocznika jest udostępniany równomiernie, co zapobiega gromadzeniu azotanów w roślinie bądź stratom przez wymywanie. Mocznik może być stosowany pod wszystkie uprawy zarówno przedsiewnie, jak i pogłównie. Można go stosować również w formie roztworu, do dolistnego dokarmiania roślin. Stosowny pogłównie działa wolniej od saletry amonowej, co warunkowane jest tempem jego hydrolizy w glebie. Nawóz ten zaleca się do stosowania na różnych glebach, z wyjątkiem kwaśnych, silnie zasadowych lub świeżo wapnowanych, w których przemiany mocznika są znacznie ograniczone. Bezpośrednio po zastosowaniu mocznika pH gleby nieznacznie wzrasta, jednak w wyniku dalszych przemian nawozu obniża się. Z tego względu mocznik uznawany jest za nawóz zakwaszający glebę.

Roztwór saletrzano-mocznikowy (RSM) jest wysoko skoncentrowanym nawozem azotowym w formie wodnego roztworu saletrzano-mocznikowego. Zawiera wszystkie dostępne formy azotu (azotanową, amonową, amidową), przez co zapewnia roślinom stały dopływ azotu w czasie wegetacji. Zalecany jest do stosowania zarówno przed-siewnego, jak i pogłównego. Płynna forma nawozu umożliwia równomierne jego rozprowadzenie na powierzchni gleby. RSM wykazuje dużą skuteczność w okresach suszy. Zaleca się stosowanie tego nawozu na wszystkie rodzaje gleb, do nawożenia zbóż, buraków, ziemniaka, kukurydzy.

Podsumowanie

Podstawowym założeniem technologii nawożenia każdej uprawy powinna być duża efektywność działania plonotwórczego azotu. Skuteczność azotu w kształtowaniu wielkości i jakości plonu roślin uprawnych zależy nie tylko od dawki, ale również od czynników produkcyjnych warunkujących efektywne pobieranie składnika z gleby i jego aktywność metaboliczną w roślinie. Azot powinien być stosowany w dawkach dopasowanych do potrzeb pokarmowych roślin, zgodnie z modelem nagromadzania tego składnika oraz tworzenia biomasy, tak aby nie ograniczał ich wzrostu i rozwoju, a w konsekwencji plonowania. Zgodnie z zaleceniami nawozowymi nawozy azotowe powinny być stosowane w systemie dwu- lub trzydawkowym, co gwarantuje lepsze wykorzystanie składnika z nawozów. Ze względów ekonomicznych i środowiskowych, wielkość pierwszej dawki powinna być korygowana na podstawie wyników testu azotu mineralnego N_{min} . Odpowiedni dobór nawozów azotowych pod względem szybkości działania zawartej w nich formy lub form azotu znacznie zwiększa efektywność wykorzystania składnika z nawozów, jednocześnie ograniczając ich negatywny wpływ na środowisko.

Literatura

1. Bowen G., Zapata F.: Efficiency in uptake and use of nitrogen by plants. Invited paper, 1991, IAEA – SM-313/130: 394-362.
2. Djokic D., Lomovic S.: Uptake and reutilization of nitrogen in reproductive period of wheat. Savremena poljoprivreda, 1990, **38 (3-4)**: 59-64.
3. Fisher R.A.: Irrigated spring wheat and timing and amount of nitrogen fertilizer. II. Physiology of grain yield response. Field Crop Research, 1993, **33**: 57-60.
4. Fotyma E.: Reakcja roślin na nawożenie azotem. Nawozy i Nawożenie – Fertilizers and Fertilization, 1988, **93**: 37-60.
5. Fotyma M., Fotyma E.: Parametry modelu optymalizacji dawek azotu pod pszenicę. Nawozy i Nawożenie – Fertilizers and Fertilization, 2002, **1(10)**: 83-89.
6. Grzebiś W.: Nawożenie roślin uprawnych. 2. Nawozy i systemy nawożenia. PWRiL, Poznań 2008, ss. 322.
7. Jadczyk T.: System doradztwa nawozowego. W: Chemia rolna. Postawy teoretyczne i praktyczne, S. Mercik (red.). SGGW, Warszawa 2002, s. 251.

8. 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.: Nawożenie mineralne na gruntach ornych i użytkach zielonych. Puławy, Wyd. IUNG-PIB, Puławy 2013, s. 5-10.
9. L e m a i r e G., G a s t a l P.: N uptake and distribution in plant canopies. In.: Diagnosis of the nitrogen status in crops, G. Lemaire (ed.). Springer Verlag, 1997, pp. 3-45.
10. M a ć k o w i a k C.: Zasady stosowania gnojowicy, Zalecenia nawozowe cz. IV, Wydawnictwo IUNG, 1994, s. 21.
11. M i G., T a n g L., Z h a n g F., Z h a n g J.: Is nitrogen uptake after anthesis regulated by sink size? Field Crop Research, 2000, **68(3)**: 183-190.
12. N a t r L.: Grain yield formation. Fragmenta Agronomica, 1995, **2(46)**: 84-93.
13. P a p a k o s t a D.K., G a g i a n a s A.A.: Nitrogen and dry matter accumulation, remobilization, and losses of Mediterranean wheat during grain filling. Agron. J., 1991, **83**: 864-869.
14. P a u l M.J., F o y e r Ch.H.: Sink regulation of photosynthesis . J. Exp. Bot., 2001, **52(360)**: 1383-1400.
15. P o d o l s k a G.: Zalecenia agrotechniczne. Technologie uprawy roślin. Pszenica ozima. Wyd. IUNG Puławy, 1994, ss. 21.
16. R o b i n s o n D.: The responses of plants to non-uniform supplies of nutrient. New Phytologists, 1994, **127**: 635-674
17. R u t k o w s k a A.: Studia nad nawożeniem pszenicy ozimej azotem. Monografia. Nawozy i Nawożenie – Fertilizers and Fertilization, 2004, **4(21)**: 45-52.
18. S c h e n k M.K.: Regulation of nitrogen uptake on whole plant level. Plant Soil, 1996, **181**: 131-137.
19. W o j c i e s k a U., W o l s k a E., G i z a A.: Wpływ zróżnicowanego zaopatrzenia w azot na wielkość i strukturę plonu oraz możliwość wykorzystania reduktazy azotanowej jako wskaźnika zaopatrzenia roślin pszenicy w azot. Pamiętnik Puławski, 1991, **98**: 23-38.
20. W r ó b e l E., S z e m p l i ń s k i W.: Plonowanie i wartość technologiczna ziarna pszenicy ozimej nawożonej zróżnicowanymi dawkami azotu. Pamiętnik Puławski, 1999, **118**: 463-470.

Adres do korespondencji:

dr Agnieszka Rutkowska
Zakład Żywienia Roślin i Nawożenia
IUNG-PIB
ul. Czartoryskich 8
24-100 Puławy
tel. (81) 886 34 21 w. 231
e-mail: agrut@iung.pulawy.pl