

STUDIA I RAPORTY IUNG-PIB

ZESZYT 53(7): 39-53

2017

Alicja Pecio

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

EFEKTYWNOŚĆ WYKORZYSTANIA AZOTU – SPOSOBY WYZNACZANIA ORAZ ZASTOSOWANIE W BADANIACH ROLNICZYCH*

Słowa kluczowe: wskaźniki wykorzystania azotu, NUE, definicje, sposoby wyznaczania, pszenica, systemy uprawy roli, warunki glebowe, efektywność wykorzystania azotu

Wstęp

Azot jest ważnym pierwiastkiem w życiu wszystkich organizmów, ale nadmierne jego ilości mogą być szkodliwe dla ekosystemów i potencjalnie dla zdrowia człowieka (11, 20, 21). Właściwa gospodarka źródłami azotu ma zatem istotne znaczenie, szczególnie w rolnictwie, gdzie wypełnia zarówno cele produkcyjne, przyczyniając się do wzrostu plonu roślin uprawnych, jak i środowiskowe – poprzez ograniczenie strat azotu. Wiedza na temat przemian i wykorzystania azotu przez rośliny uprawne, jest niezbędna zarówno rolnikom, jak i decydentom.

Podstawowym wskaźnikiem stosowanym w rolnictwie jest Efektywność Wykorzystania Azotu (ang. *Nitrogen Use Efficiency, NUE*). Wskaźnik ten, stosowany do oceny systemów produkcji roślinnej, uwzględnia zarówno wielkość produkcji, jak i bezpieczeństwo środowiskowe (2, 4, 5, 6, 13, 14, 16). NUE wyznaczany był w badaniach rolniczych według różnych koncepcji i założeń, jednakże nie sprecyzowano jednolitej metodyki jego wyliczania i wykorzystania w praktyce. W Polsce badania nad wykorzystaniem wskaźnika NUE prowadzili m.in. F o t y m a (7) oraz P o t a r z y c k i (19).

Celem pracy była próba usystematyzowania dotychczas stosowanych metod określania wskaźnika wykorzystania azotu oraz przedstawienie przykładów jego wykorzystania w badaniach rolniczych.

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

NUE według Nitrogen Expert Panel

Najbardziej uniwersalną i łatwą do zastosowania wersję wskaźnika NUE zaproponował EU Nitrogen Expert Panel (18). Wskaźnik ten wyznaczany jest na podstawie ilości azotu wnoszonego i wynoszonego z systemu według następującego wzoru: $NUE = N \text{ output} / N \text{ input}$. W systemach produkcji roślinnej uwzględniany jest azot wynoszony wraz z plonem rośliny uprawnej, a w systemach produkcji zwierzęcej – w mleku, mięsie jajkach i/lub w wełnie, w produkcji mieszanej – w jednych i drugich. W systemach rolniczych azot może być tracony m.in. w wyniku strat gazowych czy poprzez wymywanie azotanów do wód gruntowych. Część składnika czasowo gromadzona jest w glebie i może być wykorzystywana przez rośliny następcze.

Wskaźnik NUE, definiowany jako iloraz ilości azotu wynoszonego wraz z plonem i azotu wnoszonego, zależy od systemu rolniczego i sposobu zarządzania tym systemem. W systemach produkcji roślinnej NUE zależy od gatunku uprawianej rośliny i zmianowania, zabiegów agrotechnicznych, żyzności gleby i warunków środowiskowych (klimat, geomorfologia, itp.). NUE można określać w skali całego zmianowania, a przypadku stosunkowo stałych w czasie systemów możliwe są szacunki roczne. Wartość NUE jest wyrażana w procentach lub jako frakcja masy ($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$), natomiast ilość N wnoszonego ($N \text{ input}$) i N wynoszonego z plonem ($N \text{ output}$) oraz nadwyżkę bilansową N ($N \text{ surplus}$) wyraża się w $\text{kg ha}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$. Zgodnie z ustaleniami Nitrogen Expert Panel, w systemie produkcji rolniczej można wyróżnić cztery zakresy wartości wskaźnika NUE:

- $NUE < 90\%$ - ryzyko wyczerpywania gleb z azotu na skutek zbyt dużego pobrania azotu z plonem
- $NUE 50-90\%$, wielkość pobrania azotu z plonem $> 80 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$, nadwyżka bilansowa $< 80 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$ – wartość pożądana w systemie produkcji rolniczej,
- $NUE 50-90\%$, wielkość pobrania azotu z plonem $< 80 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$, nadwyżka bilansowa $< 80 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$ – wielkość plonów limitowana niedostatecznym pobraniem azotu,
- $NUE < 50\%$ - niedostateczne wykorzystanie azotu przez rośliny.

NUE zwiększa się wraz ze wzrostem ilości azotu wynoszonego wraz z plonem i/lub zmniejszaniem ilości azotu wnoszonego do systemu.

Wskaźnik NUE może być wykorzystywany zarówno w celach praktycznych, jak i strategicznych w skali systemów rolniczych oraz żywieniowych. Jednolita i łatwa do zastosowania koncepcja umożliwia porównania zarówno pomiędzy systemami, jak i krajami, latami itp. Możliwe jest również jego stosowanie w ocenie zabiegów agrotechnicznych w doświadczeniach polowych.

Klasyfikacja metod określania NUE

Według Cassman i in. (3) wskaźniki i metody określania efektywności, z jaką azot jest wykorzystywany przez rośliny można podzielić na dwie grupy:

1. Metoda bezpośrednia opiera się o znakowanie badanego nawozu izotopem ^{15}N , co umożliwia określenie ilości azotu pobieranego przez roślinę w okresie wegetacji i zakumulowanego w plonie końcowym, pozostającego w glebie oraz strat azotu z systemu gleba-roślina. Możliwe jest także określenie ilości azotu pobieranego przez roślinę następczą. Wynik jest najczęściej wyrażany w procentach. Badania z zastosowaniem izotopu ^{15}N są drogie i nie są często stosowane. Stanowią jednak najlepsze szacunki efektywności wykorzystania azotu.
2. Metoda różnicy – polega na porównaniu plonu lub pobrania składnika przez rośliny w obiekcie nawożonym azotem i w obiekcie kontrolnym (bez nawożenia).. Wskaźnik NUE, wyrażany najczęściej w procentach, można określać na dwa sposoby:
 - a) z uwzględnieniem przyrostu plonu końcowego na jednostkę azotu zastosowanego w nawozach według wzoru:

$$\text{NUE} = (Y_N - Y_0)/F_N$$

gdzie: Y_N i Y_0 oznaczają plon rośliny uprawnej odpowiednio w poletkach nawożonych i nie nawożonych, F_N – ilość zastosowanego azotu, wszystko w kg ha^{-1} . Wskaźnik jest często określany jako „Efektywność rolnicza zastosowanego azotu” (ang. *agronomic N efficiency*),

- b) z uwzględnieniem wzrostu pobrania azotu na jednostkę azotu zastosowanego w nawozach, według wzoru:

$$\text{NUE} = (U_N - U_0)/F_N$$

gdzie: U_N i U_0 oznaczają pobranie azotu przez uprawiane rośliny na poletkach nawożonych i nie nawożonych, w kg ha^{-1} . Wskaźnik jest określany wtedy jako „Wykorzystanie” lub „Efektywność wykorzystania azotu z nawozów” (ang. *crop recovery efficiency of applied N*).

Często jako Nitrogen Use Efficiency (NUE) określa się tzw. Produktywność cząstkową zastosowanego azotu PFP (ang. *Partial Factor Productivity*). Wskaźnik ten wyrażany jest w $\text{kg plonu końcowego na kg azotu zastosowanego w nawozach}$:

$$Y_N / F_N, \text{ gdzie } Y_N \text{ i } F_N \text{ oznaczono jak wyżej,}$$

Jednym ze stosowanych wskaźników jest również tzw. Efektywność fizjologiczna zastosowanego azotu (ang. *Physiological N Efficiency*), wyrażana w $\text{kg przyrostu plonu na kg azotu pobranego przez roślinę}$, obliczana jest według wzoru:

$$(Y_N - Y_0) / (U_N - U_0), \text{ gdzie } Y_N, Y_0, U_N, U_0 \text{ jak wyżej.}$$

Molli i in. (15) zdefiniowali NUE jako plon ziarna przypadający na jednostkę azotu dostępnego w glebie (w tym pozostałości N w glebie oraz N zastosowany w nawozach).

Określenie „azot dostępny” obejmuje zatem co najmniej dwa źródła azotu, w tym azot glebowy i azot z nawozów. Pierwsze źródło jest trudne do skwantyfikowania i jego miarą jest zwykle ilość azotu zgromadzonego przez rośliny na poletkach nie nawożonych. Dobrą miarą azotu z tego źródła jest zawartość azotu mineralnego w profilu glebowym. Drugie źródło, tj. azot z nawozów, jest to ilość azotu zastosowana w nawozach pod aktualnie uprawianą rośliną w czasie jej sezonu wegetacyjnego.

Według tych autorów NUE obejmuje dwa wskaźniki:

1. **Efektywność pobierania azotu NupE** (ang. *N uptake efficiency*), czyli zdolność rośliny do pobierania azotu z gleby w formie jonów azotanowych lub amonowych
2. **Efektywność wykorzystania azotu NutE** (ang. *N utilization efficiency*), czyli zdolność rośliny do wykorzystania azotu w produkcji ziarna.

Potarzycki (19) wyróżnił ponadto trzeci wskaźnik definiowany jako:

3. **Efektywność remobilizacji azotu NreE** (ang. *N remobilization efficiency*) tj. udział azotu zgromadzonego w roślinie przed kwitnieniem w puli azotu zawartego w końcowym plonie ziarna.

Określenie wskaźników wykorzystania azotu wymaga właściwego zdefiniowania elementów takich jak: biomasa rośliny B (ang. *plant biomass*), plon ziarna GY (ang. *grain yield*), całkowite pobranie azotu N_{tup} (ang. *N total uptake*), całkowita ilość dostępnego azotu N_{tsp} (ang. *total N supply*), ilość azotu dostępnego w glebie N_{sp} (ang. *soil N supply*), azot zastosowany w nawozach N_f (ang. *fertilizer N applied*). Ogólne wzory opisujące podstawowe wskaźniki przedstawiono poniżej:

- 1) **Efektywność pobierania azotu** z gleby i nawozów, *N uptake efficiency*:

$$Nup E = \frac{N_{tup}}{N_{tsp}} = \frac{Total\ N\ uptake}{Total\ N\ supply} = \frac{Całkowite\ pobranie\ N}{Całkowita\ ilość\ dostępnego\ azotu}$$

- 2) **Efektywność wykorzystania azotu** pobranego z gleby i nawozów, *N utilization efficiency*:

$$Nut E = \frac{GY}{N_{tup}} = \frac{Grain\ yield}{Total\ N\ uptake} = \frac{Plon\ ziarna}{Całkowite\ pobranie\ N}$$

W przypadku możliwości zastosowania danych eksperymentalnych, wskaźniki te mogą przyjąć praktyczną formę określającą efektywność azotu zastosowanego w nawozach:

- Efektywność rolnicza nawożenia**, *Agronomic N efficiency*:

$$A_{NE} = \frac{GY(Nf) - GY(N0)}{Nf} \quad (\text{kg ziarna} \cdot \text{kg Nf}^{-1})$$

- Efektywność fizjologiczna**, *Physiological N efficiency*:

$$P_{NE} = \frac{GY(Nf) - GY(N0)}{N_{tup}(Nf) - N_{tup}(N0)} \quad (\text{kg ziarna} \cdot \text{kg Nf}^{-1})$$

Współczynnik wykorzystania azotu z nawozów, Nitrogen apparent recovery:

$$N_{AR} = \frac{N_{tup}(Nf) - N_{tup}(N0)}{Nf} 100, \% \text{ lub } N_{AR} = \frac{P_{NE}}{A_{NE}}$$

gdzie: GY – plon ziarna (*grain yield*) wyrażony w $kg \cdot ha^{-1}$, N0 – poletko nienawożone, Nf – poletko nawożone

3) Trzeci wskaźnik, **Efektywność remobilizacji azotu, N remobilization efficiency** NreE, obejmuje zestaw wskaźników opisujących wykorzystanie azotu (*nitrogen economy*) przez roślinę uprawną w okresie wypełniania ziarna:

Remobilizacja azotu, nitrogen remobilization:

$$NR = Nat - Nhvv, (kg \cdot ha^{-1})$$

Efektywność remobilizacji azotu, nitrogen remobilization efficiency:

$$NRE = \frac{NR}{Nat} 100, (\%)$$

Zyski lub straty azotu po kwitnieniu, post-anthesis nitrogen gains or losses:

$$PANU = Nhvtot - Nat, (kg \cdot ha^{-1})$$

Efektywność pobrania azotu po kwitnieniu, efficiency of post-anthesis nitrogen uptake:

$$PANUE = \frac{PANU}{Nat} 100, (\%)$$

Indeks żniwny azotu, nitrogen harvest index:

$$NHI = \frac{Nhvg}{Nhvtot} 100, (\%)$$

gdzie: Nat - zawartość azotu w roślinie w fazie kwitnienia,
 Nhvv - zawartość azotu w wegetatywnych częściach roślin w fazie kwitnienia,
 Nhvtot – całkowita zawartość azotu w roślinie w fazie dojrzałości,
 Nhvg – zawartość azotu w ziarnie.

NUE różnych gatunków roślin

F o t y m a (8) w swoich badaniach zwróciła uwagę na zróżnicowanie wykorzystania azotu pobieranego z gleby i nawozów zależnie od gatunku uprawianej rośliny. Wiąże się to z różnym zapotrzebowaniem na ten składnik w procesach wzrostu, rozwoju i nagromadzania masy roślin. W tabeli 1 zamieszczono wartości wskaźników efektywności nawożenia azotem i wykorzystania azotu pobranego przez plon pszenicy ozimej i jarej. Podobną terminologię i ocenę efektywności nawożenia azotem stosowano wcześniej w pracach M o l l a (15), N o v o a (17) oraz H u g g i n s a (12), a także F o t y m y i n . (7, 9, 10).

- **Indeks żniwny azotu N_{Iz}** (ang. *harvest index N*) wyrażono w procentach jako stosunek ilości azotu w ziarnie pszenicy do całkowitej ilości azotu w roślinie w fazie dojrzałości. Średnia wartość indeksu dla pszenicy ozimej wynosiła 76, a dla jarej 78. Wartość indeksu pszenicy ozimej zmniejszała się w miarę wzrostu dawek tego wskaźnika. Natomiast indeks żniwny azotu pszenicy jarej nie zależał od wielkości zastosowanych dawek N.

- **Efektywność wykorzystania azotu pobranego z gleby i nawozów Wgn** (ang. *Nitrogen utilization efficiency*) przez pszenicę ozimą i jarą obliczono z ilorazu plonu ziarna i całkowitej ilości azotu w roślinie w fazie dojrzałości. Przeciętna wartość tego wskaźnika wynosiła dla pszenicy ozimej 46, a dla jarej 41 kg ziarna na 1 kg pobranego azotu i zależała od wielkości zastosowanej dawki nawozów. W miarę wzrostu dawek azotu obserwowano spadek wartości Wgn .

- **Efektywność rolnicza nawożenia Ae** (ang. *Agronomic efficiency*) jest miarą produkcyjnej skuteczności nawożenia i wyraża przyrost plonu ziarna w kg na jednostkę azotu zastosowanego w nawozach. Efektywność rolnicza nawożenia azotem pszenicy ozimej i jarej zmniejszała się w miarę wzrostu dawek azotu. Przeciętna wartość tego wskaźnika wynosiła dla pszenicy ozimej 27,1, a dla jarej 20,5 kg ziarna na 1 kg N zastosowanego w nawozach.

- **Efektywność fizjologiczna Fe** (ang. *physiological efficiency*) jest miarą fizjologicznej skuteczności nawożenia, rozumianej jako przyrost plonu ziarna na jednostkę azotu pobranego przez rośliny z nawozów. Efektywność fizjologiczna nawożenia jest zawsze większa od efektywności rolniczej. Dla pszenicy ozimej średnia wartość wynosiła 31,9, a dla jarej 30,3 kg ziarna na 1 kg azotu pobranego przez roślinę z nawozów. Wartość tego wskaźnika zależała od wielkości zastosowanych dawek azotu i zmniejszała się w miarę ich wzrostu.

- **Współczynnik wykorzystania azotu z nawozów Wn** (ang. *Apparent recovery fraction*) może być wyliczony z ilorazu efektywności rolniczej i fizjologicznej albo z ilorazu ilości azotu pobranego z nawozów i ilości azotu zastosowanego w nawozach. Wskaźnik ten wyraża się w procentach. Współczynniki wykorzystania azotu z nawozów były wysokie. Niezależnie od wielkości zastosowanych dawek wynosiły dla pszenicy ozimej 85%, a dla jarej 67%.

Tabela 1

Wskaźniki efektywności nawożenia azotem pszenicy ozimej i jarej

Dawka N kg·ha ⁻¹	N ₁₂ (%)	Wgn kg·kg ⁻¹	Ae kg·kg ⁻¹	Fe kg·kg ⁻¹	Wn (%)
Pszenica ozima					
0	78	51	-	-	-
25	77	49	38,4	45,1	85
50	76	48	32,8	38,5	85
75	76	45	26,8	31,7	85
100	76	43	21,6	25,5	85
125	76	40	16,0	18,9	85
średnio	76	46	27,1	31,9	85
Pszenica jara					
0	78	43	-	-	-
20	78	43	33,5	49,6	67
40	78	43	27,5	40,7	67
60	78	41	20,5	30,4	67
80	78	39	14,0	20,7	67
100	78	36	7,0	10,4	67
Średnio	78	41	20,5	30,3	67

Źródło: Fotyma, 1999 (8)

NUE w systemach uprawy roli

Na świecie dominują trzy systemy uprawy roli: konwencjonalny system orkowy, uproszczony oraz siew bezpośredni. Systemy te różnią się między innymi głębokością ingerencji narzędzi uprawowych w głąb profilu glebowego. W systemie konwencjonalnej uprawy orkowej pług powoduje odwracanie gleby zwykle do głębokości 25-30 cm. W systemie uprawy uproszczonej gleba jest uprawiana do głębokości 8-10 cm bez jej odwracania. Na ogół stosuje się kultywator lub bronę talerzową. W systemie siewu bezpośredniego nie wykonuje się żadnych zabiegów uprawowych, a nasiona umieszcza się bezpośrednio w glebę pokrytą mulczem. Obecnie w krajach europejskich najczęściej stosuje się system orkowy (ok. 75%), następnie system uprawy uproszczonej (ok. 23%) i siew bezpośredni (2%). W skali globalnej, w ciągu ostatnich 20 lat znacznie zwiększyła się powierzchnia uprawiana w systemie siewu bezpośredniego.

Zabiegi uprawy roli mają duży wpływ na właściwości gleby i przebieg procesów glebowych, a także na dostępność składników pokarmowych i plon roślin. Generalnie, w porównaniu do uprawy orkowej, gleba nieuprawiana staje się bardziej zbita, co utrudnia rozwój korzeni, ale poprawia transport wody w warunkach suszy. Zmiany struktury gleby i zawartości materii organicznej w czasie w wyniku uprawy uproszczonej mogą powodować wieloletnie trendy w plonach roślin. Wzrost zawartości materii organicznej w warstwie powierzchniowej gleby jest zjawiskiem

korzystnym, chociaż uprawa uproszczona powoduje na ogół ograniczenie mineralizacji materii organicznej, podczas gdy wzrost zagęszczenia gleby może prowadzić do ograniczenia plonów.

Zarówno uprawa płytka, jak i siew bezpośredni mogą powodować również silną stratyfikację składników pokarmowych w wierzchniej warstwie gleby, co ma istotne znaczenie dla wzrostu roślin. W większości przypadków jednak wpływ systemu uprawy i zagęszczenia gleby na zawartość składników pokarmowych w roślinie jest stosunkowo słaby. A zatem, wpływ na efektywność wykorzystania składników pokarmowych związany jest głównie z wpływem na plon roślin.

Analiza sporządzona przez Arvidsona i in. (1) na podstawie wielu doświadczeń prowadzonych w latach 1983-2012 wykazała, że uprawa uproszczona powoduje na ogół redukcję plonów w stosunku do uprawy orkowej o kilka procent, ale mniejszą w przypadku plonu zbóż niż plonu roślin dwuliściennych. W systemie siewu bezpośredniego plony są na ogół mniejsze niż w systemie uprawy orkowej o ok. 10%. Redukcja plonów następuje zwykle wskutek słabych wschodów połączonych z dużym zachwaszczeniem.

Poniżej przedstawiono zastosowanie wskaźnika NUE do oceny wykorzystania azotu zależnie od głębokości uprawy gleb o różnym składzie granulometrycznym. Badania prowadzono na dużych polach specjalistycznej Stacji Doświadczalnej IUNG-PIB w Baborówku (woj. wielkopolskie) w latach 2006-2013. Obszar badawczy obejmował 3 pola płodozmiennie, na których uprawiano kolejno rzepak, pszenicę ozimą i jęczmień jary. W obrębie każdego pola stosowano 3 systemy uprawy roli: system konwencjonalny na pełną głębokość warstwy ornej (podorywka na głębokość 8-10 cm oraz orka siewna na głębokość ok. 30 cm), system uprawy płytkiej (uproszczonej) na głębokość 8-10 cm (podcinanie ścierniska rośliny przedplonowej oraz spulchnianie gleby przed siewem nasion za pomocą brony Ares) i system uprawy zerowej (siew bezpośredni na głębokość 2-3 cm). Dawki nawozów mineralnych były jednakowe niezależnie od systemu uprawy roli. Całkowita dawka azotu pod pszenicę ozimą każdego roku wynosiła ok. 155 kg N·ha⁻¹. Nawożenia organicznego nie stosowano. Zbiór pszenicy prowadzono w fazie dojrzałości pełnej ziarna, przy czym słomę pozostawiano na polu.

Badania właściwości gleby i łanu prowadzono metodą obserwacji naukowych. W tym celu w poszczególnych polach wydzielono stałe powierzchnie o wielkości około 100 m² każdy, które reprezentowały cztery jednostki glebowe, różniące się składem granulometrycznym w warstwie profilu 0-30 cm. Były to: glina lekka (gl), piasek gliniasty mocny (pgm), piasek gliniasty lekki (pgl) i piasek słabogliniasty (ps). Dlatego też, uwzględniając 3 systemy uprawy roli w polu pszenicy ozimej, obserwacje i pomiary w każdym roku badań wykonywano w obrębie 12 obszarów o powierzchni ok. 100 m² każdy.

Wyznaczono trzy grupy wskaźników wykorzystania azotu przez rośliny pszenicy ozimej według następujących wzorów:

I. Wskaźniki plonu:

- 1) plon ziarna i słomy ($t \cdot ha^{-1}$),
- 2) pobranie N przez ziarno i słomę: $N_{UP} = \frac{\text{Plon sm} \cdot \text{zawartość N}}{100} \text{ (kg} \cdot \text{ha}^{-1}\text{)}$
- 3) wskaźnik zbioru: $HI = \frac{\text{Plon ziarna}}{\text{Plon ziarna} + \text{plon słomy}} 100 \text{ (\%)}$
- 4) indeks żniwny azotu:

$$NHI = \frac{\text{Zawartość N w ziarnie}}{\text{Całkowita zawartość N w roślinie w fazie dojrzałości}} 100 \text{ (\%)}$$

II. Wskaźniki wykorzystania azotu z gleby i zastosowanych nawozów:

- 1) Efektywność pobierania azotu:

$$NupE = \frac{\text{Całkowite pobranie N}}{\text{Całkowita ilość dostępnego azotu}} \text{ (kg} \cdot \text{ha}^{-1}\text{)}$$

- 2) Efektywność wykorzystania azotu pobranego z gleby i z nawozów:

$$NutE = \frac{\text{Plon ziarna}}{\text{Całkowite pobranie N przez roślinę}} \text{ (kg} \cdot \text{ha}^{-1}\text{)}$$

III. Wskaźniki wykorzystania azotu z nawozów:

- 1) Produktywność cząstkowa zastosowanego azotu, *Partial Factor Productivity*, *NUE*:

$$PFP_N = \frac{\text{Plon ziarna}}{\text{Dawka N w nawozach}} \text{ (kg} \cdot \text{kg}^{-1}\text{)}$$

- 2) Efektywność rolnicza nawożenia azotem, *Agronomic N efficiency*:

$$A_{NE} = \frac{\text{Plon ziarna N1} - \text{Plon ziarna N0}}{\text{Dawka N w nawozach}} \text{ (kg} \cdot \text{kg}^{-1}\text{)}$$

- 3) Efektywność wykorzystania azotu z nawozów, *Crop recovery efficiency*:

$$RE_N = \frac{\text{Pobranie azotu N1} - \text{Pobranie azotu N0}}{\text{Dawka N w nawozach}} \text{ (kg} \cdot \text{kg}^{-1}\text{)}$$

- 4) Efektywność fizjologiczna nawożenia azotem, *Physiological N efficiency*:

$$P_{NE} = \frac{\text{Plon ziarna N1} - \text{Plon ziarna N0}}{\text{Pobranie azotu N1} - \text{Pobranie azotu N0}} \text{ (kg} \cdot \text{kg}^{-1}\text{)}$$

5) Współczynnik wykorzystania azotu z nawozów, *Nitrogen apparent recovery*:

$$N_{AR} = \frac{\text{Efektywność rolnicza nawożenia N}}{\text{Efektywność fizjologiczna nawożenia N}} 100 (\%)$$

Stwierdzono, że głębokość ingerencji narzędzi uprawowych nie powodowała istotnych zmian wartości podstawowych wskaźników plonu pszenicy ozimej, tj. plon ziarna, plon słomy, pobranie azotu przez słomę i ziarno, indeks żniwny plonu oraz indeks żniwny azotu (Tab. 2) oraz zgodnie z wynikami badań innych autorów (1) nie różnicowała istotnie wskaźników wykorzystania azotu z gleby i nawozów, tj. efektywność pobierania azotu NupE i efektywność wykorzystania azotu NutE, a także wskaźników wykorzystania azotu z zastosowanych nawozów, tj. produktywność cząstkowa zastosowanego azotu PFP_N, efektywność rolnicza nawożenia azotem A_{NE}, efektywność wykorzystania azotu z nawozów RE_N, efektywność fizjologiczna nawożenia azotem P_{NE}, współczynnik wykorzystania azotu z nawozów N_{AR} (Tab. 3). Spłycona uprawa uproszczona i siew bezpośredni powodowały jednak niewielką ich redukcję w stosunku do uprawy konwencjonalnej.

Tabela 2

Plonowe wskaźniki wykorzystania azotu przez pszenicę ozimą zależnie od systemu uprawy roli

System uprawy roli	Plon ziarna (t·ha ⁻¹)	Plon słomy (t·ha ⁻¹)	Pobranie N ziarno (kg·ha ⁻¹)	Pobranie N słoma (kg·ha ⁻¹)	Indeks żniwny (%)	Indeks żniwny N (%)
Konwencjonalny	5,91	7,95	84,8	42,9	78,1	76,0
Uproszczony	5,62	7,41	79,2	38,4	78,2	75,8
Siew bezpośredni	5,52	7,52	79,2	39,2	76,5	75,2
NIR _{0,05}	r.n.*	r.n.	r.n.	r.n.	r.n.	r.n.

*różnica nieistotna, test Tukey'a

Źródło: opracowanie własne

Tabela 3

Wskaźniki wykorzystania azotu z gleby i zastosowanych nawozów przez pszenicę ozimą zależnie od systemu uprawy roli

System uprawy roli	NupE (kg·ha ⁻¹)	NutE (kg·ha ⁻¹)	PFP _N (kg·kg ⁻¹)	A _{NE} (kg·kg ⁻¹)	RE _N (kg·kg ⁻¹)	P _{NE} (kg·kg ⁻¹)	N _{AR} (%)
Konwencjonalny	72,9	29,8	38,1	19,8	0,59	38,9	57,3
Uproszczony	67,9	29,9	36,3	17,9	0,55	33,5	52,5
Siew bezpośredni	68,2	29,8	35,6	17,4	0,55	35,1	52,9
NIR _{0,05}	r.n.*	r.n.	r.n.	r.n.	r.n.	r.n.	r.n.

*różnica nieistotna, test Tukey'a

Źródło: opracowanie własne

Istotne ograniczenie wartości tych wskaźników we wszystkich systemach uprawy stwierdzono w miarę pogarszania warunków glebowych (Tab. 4-6), czyli niezależnie od głębokości ingerencji narzędzi uprawowych w głąb profilu glebowego, azot był najlepiej wykorzystywany w lepszych warunkach glebowych. Wartości wskaźników efektywności wykorzystania azotu zmniejszały się od gleb

o składzie granulometrycznym gliny lekkiej, poprzez piasek gliniasty mocny i piasek gliniasty lekki do piasku słabo gliniastego, gdzie były najmniejsze. Spośród wskaźników plonowych, warunki glebowe najbardziej różnicowały plon ziarna i plon słomy oraz pobranie azotu w słomie. We wszystkich systemach uprawy stwierdzono także istotny wpływ warunków glebowych na obydwa wskaźniki wykorzystania azotu z gleby i zastosowanych nawozów, tj. efektywność wykorzystania azotu NupE i efektywność pobierania azotu NutE oraz na jeden ze wskaźników wykorzystania azotu z nawozów, tj. produktywność cząstkową zastosowanego azotu PFP_N. W warunkach uprawy konwencjonalnej skład granulometryczny gleby wykazywał także istotny wpływ na efektywność rolniczą nawożenia azotem A_{NE}, a w ramach systemu uprawy uproszczonej na efektywność wykorzystania azotu z nawozów RE_N i współczynnik wykorzystania azotu z nawozów N_{AR}.

Tabela 4

Wskaźniki wykorzystania azotu przez pszenicę ozimą zależnie od składu granulometrycznego gleby w warunkach konwencjonalnego systemu uprawy roli

Wskaźnik	Skład granulometryczny gleb				NIR _{0,05}
	gl	pgm	pgl	ps	
Plon ziarna (t·ha ⁻¹)	6,91 a	6,22 ab	6,01 ab	4,51 b	1,815
Plon słomy (t·ha ⁻¹)	9,48 a	8,68 a	8,13 a	5,53 b	2,412
Pobranie N ziarno (kg·ha ⁻¹)	90,4	92,4	85,6	70,5	r.n.*
Pobranie N słoma (kg·ha ⁻¹)	47,5	49,7	39,3	35,0	r.n.
Indeks żniwny (%)	79,3	75,4	79,2	78,7	r.n.
Indeks żniwny N (%)	72,9	73,9	77,8	76,3	r.n.
NupE (kg·ha ⁻¹)	80,2 a	83,3 a	67,2 ab	60,7 b	21,88
NutE (kg·ha ⁻¹)	36,0 a	33,6 ab	31,8 ab	25,1 b	9,89
PFP _N (kg·kg ⁻¹)	44,5 a	40,1 a	38,7 ab	29,0 b	10,35
A _{NE} (kg·kg ⁻¹)	26,4 a	17,2 ab	21,2 ab	14,4 b	11,81
RE _N (kg·kg ⁻¹)	0,66	0,57	0,65	0,49	r.n.
P _{NE} (kg·kg ⁻¹)	56,2	35,6	35,1	28,5	r.n.
N _{AR} (%)	66,2	51,9	62,1	49,0	r.n.

*różnica nieistotna, test Tukey'a

Źródło: opracowanie własne

Tabela 5

Wskaźniki wykorzystania azotu przez pszenicę ozimą zależnie od składu granulometrycznego gleby w warunkach uproszczonego systemu uprawy roli

Wskaźnik	Skład granulometryczny gleb				NIR _{0,05}
	gl	pgm	pgl	ps	
Plon ziarna (t·ha ⁻¹)	6,39 a	6,22 a	5,78 ab	4,11 b	1,766
Plon słomy (t·ha ⁻¹)	9,12 a	8,25 a	7,51 a	4,78 b	2,418
Pobranie N ziarno (kg·ha ⁻¹)	89,6	85,9	83,7	57,4	r.n.
Pobranie N słoma ((kg·ha ⁻¹)	45,5 a	42,7 a	38,7 ab	26,6 b	17,70
Indeks żniwny (%)	77,4	78,2	77,3	79,8	r.n.
Indeks żniwny N (%)	75,1	75,3	77,1	76,5	r.n.

Tabela 5 cd.

NupE (kg·ha ⁻¹)	79,0 a	77,2 a	70,7 a	44,7 b	23,17
NupE (kg·ha ⁻¹)	33,0 a	33,1 a	30,9 ab	22,7 b	8,69
PFP _N (kg·kg ⁻¹)	41,2 a	40,1 a	37,3 a	26,5 b	10,24
A _{NE} (kg·kg ⁻¹)	22,9	17,1	19,8	11,9	r.n.
RE _N (kg·kg ⁻¹)	0,66 a	0,52 ab	0,63 a	0,37 b	0,231
P _{NE} (kg·kg ⁻¹)	35,7	40,1	32,0	26,0	r.n.
N _{AR} (%)	65,7 a	46,9 ab	59,6 ab	37,6 b	25,19

*różnica nieistotna, test Tukey'a

Źródło: opracowanie własne

Tabela 6

Wskaźniki wykorzystania azotu przez pszenicę ozimą zależnie od składu granulometrycznego gleby w warunkach siewu bezpośredniego

Wskaźnik	Skład granulometryczny gleb				NIR _{0,05}
	gl	pgm	pgl	ps	
Plon ziarna (t·ha ⁻¹)	6,42 a	6,20 a	5,49 ab	3,97 b	1,780
Plon słomy (t·ha ⁻¹)	9,20 a	8,48 a	7,44 a	4,99 b	2,510
Pobranie N ziarno (kg·kg ⁻¹)	88,2	88,9	79,5	60,2	r.n.
Pobranie N słoma (kg·kg ⁻¹)	44,0 a	47,3 a	39,8 ab	29,2 b	17,35
Indeks żniwny (%)	76,1	78,6	77,3	73,8	r.n.
Indeks żniwny N (%)	76,3	76,9	75,0	75,0	r.n.
NupE (kg·ha ⁻¹)	78,6 a	77,8 a	66,3 ab	50,0 b	21,06
NupE (kg·ha ⁻¹)	34,1 a	33,5 a	29,8 ab	21,9 b	9,62
PFP _N (kg·kg ⁻¹)	41,4 a	40,0 a	35,4 ab	25,6 b	10,85
A _{NE} (kg·kg ⁻¹)	23,2	17,1	17,9	11,3	r.n.
RE _N (kg·kg ⁻¹)	0,66	0,56	0,58	0,40	r.n.
P _{NE} (kg·kg ⁻¹)	36,3	36,6	33,4	34,14	r.n.
N _{AR} (%)	65,6	51,5	54,5	39,9	r.n.

*różnica nieistotna, test Tukey'a

Źródło: opracowanie własne

Według D o b e r m a n a (4), najważniejszy dla rolnika jest najbardziej wrażliwy na warunki glebowe wskaźnik produktywności cząstkowej zastosowanego azotu PFP_N ponieważ integruje w sobie efektywność wykorzystania azotu z dwóch źródeł, tj. z aktualnych zasobów w glebie oraz z zastosowanych nawozów, zgodnie z wzorem: $PFP_N = (Y_0 / F_N) + A_{NE}$. Zarówno zwiększająca się efektywność wykorzystania N zgromadzonego w glebie (Y_0), jak i efektywność zastosowanego azotu A_{NE} są jednakowo ważne dla poprawy PFP_N. Wskaźnik najczęściej przyjmuje wartości w zakresie 40-70 kg ziarna kg⁻¹N. Wartości powyżej 70 kg·kg⁻¹ są wynikiem małych dawek nawożenia azotem lub bardzo efektywnych technologii uprawy.

Efektywność rolnicza A_{NE} wynika z efektywności wykorzystania N z zastosowanych nawozów i efektywności, z jaką roślina wykorzystuje każdą dodatkową jednostkę N: $A_{NE} = RE_N \times P_{NE}$. Zależy od dawki N, uprawianej rośliny oraz zabiegów agrotechnicznych, które oddziałują na RE_N i P_{NE} . Zwykle przyjmuje wartości od 10 do 30 kg ziarna kg⁻¹N. Wartości większe uzyskuje się w warunkach dobrej technologii uprawy, małych dawek nawożenia N lub małych zasobów N w glebie.

Efektywność wykorzystania azotu z nawozów RE_N zależy od zgodności pomiędzy zapotrzebowaniem rośliny i ilością N uwalnianego z nawozów. Związana jest ze sposobem aplikacji (ilość, termin, głębokość, forma N) oraz czynnikami, które determinują *sink* uprawianych roślin (genotyp, klimat, gęstość roślin w łanie, występowanie stresów). Wartości RE_N wahają się w zakresie od 0,30 do 0,50 $kg \cdot kg^{-1}$. Wartości w przedziale 0,50-0,80 RE_N występują w dobrze zarządzanych systemach rolniczych, w warunkach małych dawek nawożenia N lub małych zasobów N w glebie.

Efektywność fizjologiczna nawożenia azotem P_{NE} oznacza zdolność rośliny do przekształcania N pozyskanego z nawozów w plon użytkowy. Zależy od właściwości genotypowych uprawianej rośliny (np. indeks zbioru), czynników środowiska i zabiegów agrotechnicznych, szczególnie w fazach generatywnych rozwoju roślin. Optymalne wartości P_{NE} wynoszą od 30 do 60 $kg \cdot kg^{-1}$. Wartości niskie oznaczają słaby wzrost na skutek niedoboru składników pokarmowych, stresu suszy lub wysokiej temperatury, obecności pierwiastków toksycznych, szkodników, chorób itp. Wartości większe od 60 $kg \cdot kg^{-1}$ oznaczają dobrze zarządzany system, małe dawki N stosowanego w nawozach lub małe zasoby N w glebie.

Podsumowanie

Efektywność Wykorzystania Azotu (ang. *Nitrogen Use Efficiency, NUE*) jest podstawowym wskaźnikiem stosowanym w rolnictwie do oceny poprawności zarządzania zasobami tego składnika. Wykorzystywany był w wielu badaniach naukowych, jednakże nie sprecyzowano jednolitej metodyki jego wyznaczania i wykorzystania w praktyce. Obliczany był według różnych koncepcji i założeń. Najbardziej uniwersalną i łatwą do zastosowania wersję wskaźnika NUE zaproponował *EU Nitrogen Expert Panel*, według którego wskaźnik ten opiera się na zasadzie bilansu masy i wyznaczany jest na podstawie ilości azotu wnoszonego i wynoszonego z systemu według następującego wzoru: $NUE = N\ output/N\ input$.

Wskaźnik NUE definiowany jest również jako wielkość plonu ziarna przypadająca na jednostkę azotu dostępnego w glebie, przy czym uwzględnia się co najmniej dwa źródła azotu, w tym azot glebowy i azot z nawozów. Wyróżnia się wtedy Efektywność pobierania azotu (ang. *N Uptake Efficiency*), czyli zdolność rośliny do pobierania azotu z gleby w formie jonów azotanowych lub amonowych, Efektywność wykorzystania azotu (ang. *N Utilization Efficiency*), czyli zdolność rośliny do wykorzystania azotu w produkcji ziarna oraz Efektywność remobilizacji azotu (ang. *N Remobilization Efficiency*) tj. udział azotu zgromadzonego w roślinie przed kwitnieniem w puli azotu zawartego w końcowym plonie ziarna.

Metody wyznaczania wskaźnika wykorzystania azotu z nawozów dzieli się na ogół na bezpośrednie, oparte o znakowanie nawozów izotopem ^{15}N oraz metody różnicy w wykorzystaniu azotu przez rośliny w obiekcie nawożonym i nienawożonym. Wtedy uwzględnia się przyrost plonu końcowego (Efektywność rolnicza, ang. *Agronomic*

N Efficiency) lub pobrania azotu na jednostkę zastosowanego azotu (Współczynnik wykorzystania N z nawozów, ang. *Crop Recovery Efficiency of applied N*). Często stosowane są też dwa inne wskaźniki, tj. Produktywność cząstkowa zastosowanego azotu (ang. *Partial Factor Productivity*), która określa wielkość plonu ziarna w przeliczeniu na jednostkę zastosowanego azotu oraz Efektywność fizjologiczna (ang. *Physiological N Efficiency*), wyrażana w kg przyrostu plonu na kg wzrostu zawartości N w roślinie.

Literatura

1. Arvidsson J., Etana A., Rydberg T. Crop yield in Swedish experiments with shallow tillage and no-tillage 1983-2012. *EJA*, 2013, **52**: 307-315.
2. Cassman K.G., Dobermann A.R., Walters D.T. Agroecosystems, nitrogen-use efficiency. And nitrogen management. *Ambio*, 2002, **31(2)**: 132-140.
3. Cassman K.G., Peng S., Olk D.C., Ladha J.K., Reichardt W., Dobermann A., Singh U. Opportunities for increasing nitrogen use efficiency from improved resources management in irrigated rice systems. *Field Crops Res.*, 1998, **56**: 7-38.
4. Dobermann A. Nitrogen Use Efficiency – State of the Art. IFA International Workshop on Enhanced-efficiency Fertilizers, Frankfurt, Germany, 28-30 June, 2005. International Fertilizer Industry Association (IFA), Paris. Paper 316. <http://digitalcommons.unl.edu/agronomyfacpub/316>. 17 ss.
5. Dobermann A. Nutrient Use Efficiency – measurement and management. In: Fertilizer best management practices. General principles, strategy for their adoption and voluntary initiatives vs regulations. IFA International Workshops on Fertilizer Management Practices. Brussels, Belgium, 2007: 1-28.
6. Fixen P., Brentrup F., Bruulsema T., Garcia F., Norton R., Zingore S. Nutrient/fertilizer use efficiency; measurement, current situation and trends. Chapter 1 in *Managing water and fertilizer for sustainable agricultural intensification*. IFA/ IWMI/ IPI. 2014: 30 ss.
7. Fotyma E. Efektywność nawożenia azotem podstawowych roślin uprawy polowej. *Fragm. Agron.*, 1997, **1**: 46-66.
8. Fotyma E. Pobranie i wykorzystanie azotu przez pszenicę ozimą i jarą. *Pam. Puł.*, 1999, **118**: 143-152.
9. Fotyma E., Maćkowiak H. Wycena efektu bezpośredniego i następczego nawożenia azotem w dwupolowych członach zmianowań. *Pam. Puł.*, 1992, **100**: 37-59.
10. Fotyma E., Fotyma M., Pietrasz-Kęsik G. Wykorzystanie azotu z nawozów przez rośliny uprawy polowej. *Pam. Puł.*, 1992, **102**: 7-34.
11. Galloway J.N., Townsend A.R., Erismann J.W., Bekunda M., Cai Z., Freney J.R., Martinelli L.A., Seitzinger S.P., Sutton M.A. Transformation of the nitrogen cycle: recent trends, questions, and potential solutions. *Science*, 2008, **320(5878)**, 889-892. Doi: 10.1126/science.1136674.
12. Huggins D.R. Nitrogen efficiency component analysis: an evaluation of cropping system differences in productivity. *Agron. J.*, 1993, **85**: 898-905.
13. Johnston A.E., Poulton P.R. Nitrogen in agriculture: an overview and definitions of nitrogen use efficiency. *International Fertilizer Society, Proceedings*, 2009, **651**: 48 ss, ISBN 978-0-85310-288-5.
14. Ladha J.K., Pathak H., Krupnik T.J., Six J., van Kessel C. Efficiency of fertilizer nitrogen in cereal production: retrospects and prospects. *Advances in Agronomy*, 2005, **87**: 85-156.
15. Moll R., Kamprath E., Jackson W. Analysis and interpretation of factors which contribute to efficiency of nitrogen utilization. *Agron. J.*, 1982, **74**: 562-564.

16. Mosier A.R., Syers J.K., Freney J.R. (Eds.). Agriculture and the Nitrogen Cycle. Assessing the Impacts of Fertilizer Use on Food production and the Environment. Washington DC: Island Press SCOPE, 2004, **65**: 296 ss.
 17. Novoa R. Nitrogen and plant protection. Plant Soil, 1981, **58**: 177-204.
 18. Oenema O. Nitrogen Use Efficiency (NUE) – an indicator for the utilization of nitrogen in agricultural and food systems. International Fertilizer Society, Proceedings, 2015, **773**: 33 ss.
 19. Potarzycki J. Improving nitrogen use efficiency of maize by better fertilizing practices. Review. Nawozy i Nawożenie, 2010. **39**: 5-25.
 20. Sutton M.A., Bleeker A., Howard C.M., Bekunda M., Grizzetti B., de Vries W., van Grinsven H.J.M., Abrol Y.P., Adhya T.K., Billen G., Davidson E.A., Datta A., Diaz R., Erisman J.W., Liu X.J., Oenema O., Palm C., Raghuram N., Reis S., Scholze R.W., Sims T., Westhoek H., Zhang F.S. Our Nutrient World: The challenge to produce more food and energy with less pollution. Global overview of Nutrient Management. Published by CEH Edinburgh and UNEP Nairobi, 2013, ss. 128.
 21. Sutton M.A., Howard C.M., Erisman J.W., Billen G., Bleeker A., Grennfelt P., van Grinsven H., Grizzetti B. (Eds.). The European Nitrogen Assessment: sources, effects and policy perspectives. Cambridge University Press. 2011: ss. 612.
-

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: alap@iung.pulawy.pl

