

**Agnieszka Rutkowska**

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

INNOWACJE W ZAKRESIE BADAŃ NAD NAWOŻENIEM AZOTEM  
W ZAKŁADZIE ŻYWIENIA ROŚLIN I NAWOŻENIA IUNG-PIB  
ORAZ ROZWÓJ RYNKU NAWOZÓW AZOTOWYCH W POLSCE\*

**Słowa kluczowe:** nawożenie azotem, testy roślinne i glebowe, nawozy azotowe, rynek, rozwój, innowacje

---

**Wstęp**

W okresie powojennym, w latach 1945–1960, w celu upowszechnienia wśród rolników wiedzy na temat nawożenia mineralnego i demonstrowania jego efektów, Państwowy Instytut Naukowy Gospodarstwa Wiejskiego w Puławach (PINGW), a potem Instytut Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa oraz państwowe technika rolnicze, przeprowadziły na własnych polach doświadczalnych, jak również w powołanej sieci terenowych ośrodków wiedzy rolniczej, dużą liczbę prostych doświadczeń, a właściwie demonstracji polowych. Schemat tych doświadczeń, często jednopowtórzeniowych, obejmował z reguły osiem obiektów, uwzględniających trzy podstawowe składniki pokarmowe – azot, fosfor i potas, stosowane w różnych kombinacjach: N, P, K, NP, NK, PK, NPK, z uwzględnieniem obiektu kontrolnego, bez nawożenia. Do schematu wielu doświadczeń włączano obornik, jako nawóz porównawczy. W związku z planem budowy nowej, dużej fabryki nawozów azotowych, przeprowadzono liczne doświadczenia z porównaniem działania różnych form tych nawozów, w tym nieznanego dotąd mocznika. Na przełomie lat 60. i 70. ubiegłego wieku miały miejsce wydarzenia o fundamentalnym znaczeniu dla badań nawozowych i wprowadzania na szeroką skalę nawozów mineralnych do praktyki rolniczej. W 1950 roku po reorganizacji PINGW powstał Instytut Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa, uzupełniona została bardzo dotychczas nieliczna sieć okręgowych stacji chemiczno-rolniczych i wreszcie, w 1966 roku, w jednej z największych europejskich fabryk nawozów azotowych – Zakładach Azotowych „PUŁAWY II”,

---

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

uruchomiono produkcję nawozów azotowych, głównie saletry amonowej i mocznika. Tym samym rolnictwo polskie wkroczyło w okres chemizacji, który trwał praktycznie do początku XXI wieku. W okresie ostatnich 20 lat w zakresie nawożenia azotem pojawiło się szereg zmian zarówno w sferze badań, jak i produkcji.

W pracy przedstawiono historię badań nad nawożeniem azotem w IUNG-PIB w okresie 1950–2020. Słowo «innowacje» w tytule pracy dotyczy zarówno hipotez i schematów nawozowych doświadczeń polowych, jak również sposobu opracowania wyników i ich podsumowania w formie zaleceń dla praktyki rolniczej. W opracowaniu omówiono również kierunki zmian, jakim podlegał polski przemysł nawozów azotowych, od powstania w 1930 r. Państwowej Fabryki Nawozów Azotowych w Mościcach, do czasów współczesnych.

### Określenie efektu wzrastających dawek nawozów azotowych

W latach 60. XX w., na polach państwowych techników rolniczych, założono ponad sto jednoczynnikowych doświadczeń płodozmiennych z nawożeniem azotem, fosforem i potasem (seria azotowa, fosforowa, potasowa). W doświadczeniach tych stosowano cztery dawki nawozów azotowych oraz pięć dawek nawozów fosforowych i potasowych (1). W tym samym czasie przeprowadzono analogiczne serie doświadczeń w Zakładach Doświadczalnych IUNG (3). Założono, że schematy tych doświadczeń powinny być zgodne z badaniami prowadzonymi w tym samym czasie w NRD, uzyskując w ten sposób dużą liczbę wyników opisujących reakcję różnych roślin uprawy polowej na wzrastające dawki nawozów (tab. 1).

Tabela 1  
Średnie plony zbóż ozimych ( $t \cdot ha^{-1}$ ) uzyskane w 582 doświadczeniach prowadzonych w latach 1962–1966

Dawka nawozów $kg \cdot ha^{-1}$	Żyto	Pszenvica	Owies	Jęczmień jary
Bez nawozów	1,86	2,36	1,84	2,30
PK N 0	2,05	2,62	2,09	2,74
PK N 30	2,21	2,85	2,61	3,01
PK N 60	2,49	2,87	2,91	3,28
PK N 90	2,48	2,84	2,99	3,33

Źródło: Adamus i in., 1969 (1)

Z uwagi na lokalizację doświadczeń na różnych glebach możliwe było określenie wielkości plonów zbóż i efektu działania azotu z uwzględnieniem kompleksu przydatności rolniczej gleb (22).

### Wyznaczenie optimum wielkości dawek nawozów azotowych

Prowadzone w poprzednim okresie badania doświadczalne uwzględniały jedynie trzy poziomy nawożenia azotem oraz obiekt kontrolny, co uniemożliwiało wyznaczenie

optymalnej dawki tego składnika. Dlatego na przełomie lat 80. i 90. XX w., przy współdziałaniu doświadczalnictwa terenowego, przeprowadzono ponad sto pięćdziesiąt doświadczeń płodozmiennych, z pięcioma–siedmioma dawkami azotu i obiektem kontrolnym (7, 10). Dane uzyskane z tych doświadczeń można było interpretować, wykorzystując wielomianowe funkcje ciągłe i funkcje nieciągłe, z równoczesnym wyznaczeniem optimum dawek azotu. Funkcje te miały następującą postać:

$$\text{Funkcja ciągła: } y = a + bN + cN^2, \quad N_{\text{opt}} = -b/2c$$

$$\text{Funkcje nieciągłe: } y_1 = a_1 + b_1N, \quad y_2 = a_2 + b_2N, \quad N_{\text{opt}} = (a_1 - a_2)/(b_2 - b_1),$$

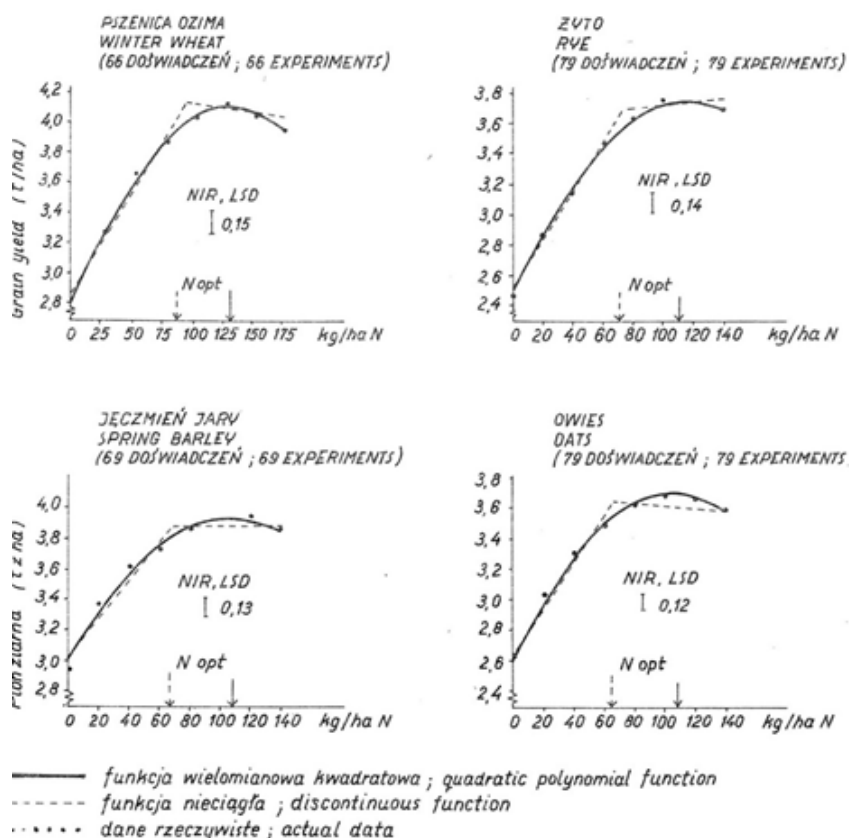
gdzie:

y = plon ziarna;

N = dawka azotu ( $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ );

a, b, c – współczynniki równania.

Wykresy funkcji dla uprawianych gatunków zbóż przedstawiono na rysunku 1, natomiast w tabeli 2 zamieszczono średnie optymalne dawki nawozów azotowych.



Rys. 1. Krzywe reakcji zbóż na nawożenie azotem

Źródło: Fotyma, 1988 (7)

Tabela 2

Optymalne dawki nawozów w 129 doświadczeniach terenowych prowadzonych w latach 1979–1983

Roślina	Funkcja ciągła		Funkcja nieciągła		Funkcja ciągła zmodyfikowana*	
	Nopt kg·ha <sup>-1</sup>	plon max t·ha <sup>-1</sup>	Nopt kg·ha <sup>-1</sup>	plon max t·ha <sup>-1</sup>	Nopt kg·ha <sup>-1</sup>	plon opt. t·ha <sup>-1</sup>
Pszenica	128	4,10	87	3,97	83	3,95
Żyto	115	3,85	70	3,60	82	3,71
Jęczmień	106	3,99	67	3,84	70	3,86
Owies	104	3,76	67	3,59	74	3,64

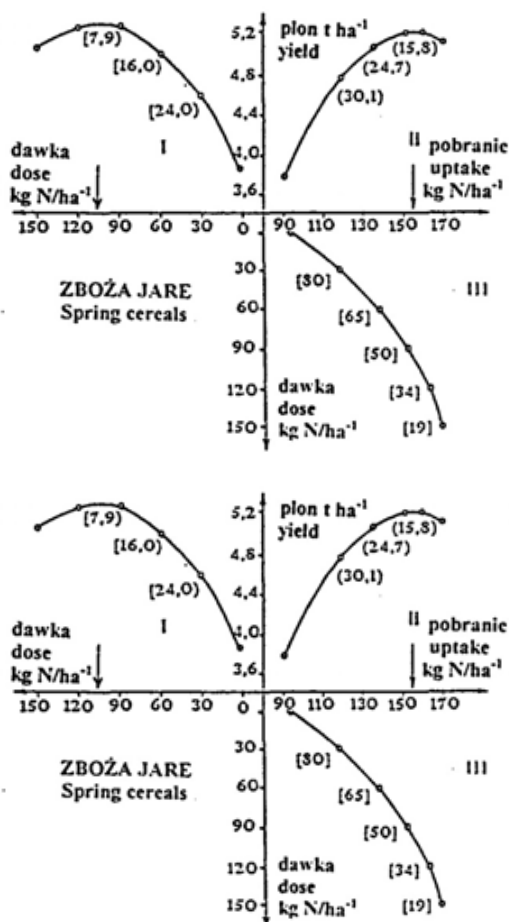
\*dawka wyliczona dla plonu maksymalnego z funkcji ciągłej pomniejszonego o przedział ufnosci

Źródło: Fotyma, 1988 (7)

Optymalne dawki azotu wyliczone z funkcji ciągłej były znacznie większe od dawek wyznaczonych z funkcji nieciągłej. Wynika to z przebiegu funkcji ciągłej (parabolicznej), która jest znacznie spłaszczona w pobliżu wierzchołka. Dużemu przyrostowi dawek w tym obszarze odpowiada mały przyrost plonu, stąd optymalna dawka N jest przeszacowana. Z tego powodu, dla celów praktyki rolniczej, zalecono dawki mieszczące się pośrodku dawek wyliczonych z obydwu typów funkcji.

Warto zwrócić uwagę na znacznie większe plony uzyskiwane w tych doświadczeniach w porównaniu z plonami podanymi w tabeli 1. Wynika to zarówno z postępu w technice doświadczałnej, jak i ogólnego postępu w rolnictwie polskim.

Od połowy lat dziewięćdziesiątych wyniki doświadczeń zaczęto przedstawiać w postaci trzyczęściowych diagramów efektywności, które umożliwiają generalizację uzyskanych wyników i wykorzystanie ich w systemie doradztwa nawozowego (rys. 2). Diagramy te, oprócz klasycznej zależności plon–dawka nawozu przedstawiają również zależność pomiędzy plonem a ilością pobranego przez rośliny azotu oraz pomiędzy ilością pobranego składnika a wielkością dawki (10).

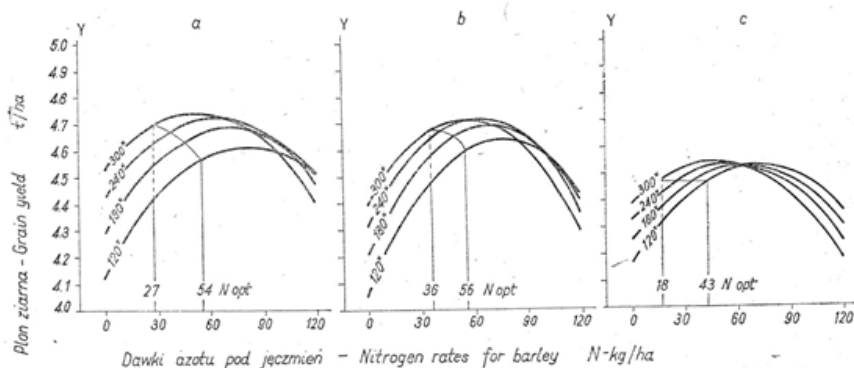


Rys. 2. Diagramy efektywności nawożenia zbóż azotem

Źródło: Fotyma, 2000 (10)

### Efekt następczy nawozów azotowych

W latach 70. XX w. rozpoczęto również badania nad efektem następczym nawozów azotowych, stosowanych w dużych, zalecanych wówczas dawkach tego składnika (19). W latach 1974–1977 w zakładach doświadczalnych IUNG założono serię doświadczeń w dwupolowych członach zmianowań. W pierwszym roku pod roślinę okopową uprawianą na dużych poletkach stosowano cztery dawki nawozów azotowych w ilościach od 120 do 300 kg N·ha<sup>-1</sup>. W drugim roku duże poletka, na których uprawiano jęczmień jary jako roślinę następczą dzielono na cztery części i w obrębie każdej z nich aplikowano pięć dawek nawozów azotowych (0–120 N·ha<sup>-1</sup>). Reakcję jęczmienia na nawożenie opisano ciągłymi krzywymi wyznaczonymi dla każdej z dawek azotu stosowanych pod przedplon (rys. 3).



Rys. 1. Plony ziarna jęczmienia po różnych przedplonach: a — ziemniak, b — burak cukrowy, c — kapusta pastewna. x — dawki N pod przedplon  
 Grain yields of barley after different forecrops: a — potatoes, b — sugar beets, c — fodder kale, x — N rates to forecrops  
 a —  $Y = 3,675757 + 0,00436.N - 0,000005.N^2 + 0,014933.n - 0,000075.n^2 - 0,000023.N.n$   
 b —  $Y = 3,642514 + 0,004012.N - 0,000005.N^2 + 0,018472.n - 0,000104.n^2 - 0,000023.N.n$   
 c —  $Y = 3,982614 + 0,001652.N - 0,000001.N^2 + 0,012232.n - 0,000069.n^2 - 0,000019.N.n$   
 Y — plon ziarna jęczmienia — grain yield of barley  
 N — dawka azotu pod przedplon — nitrogen rate for forecrop  
 n — dawka azotu pod jęczmień — nitrogen rate for barley

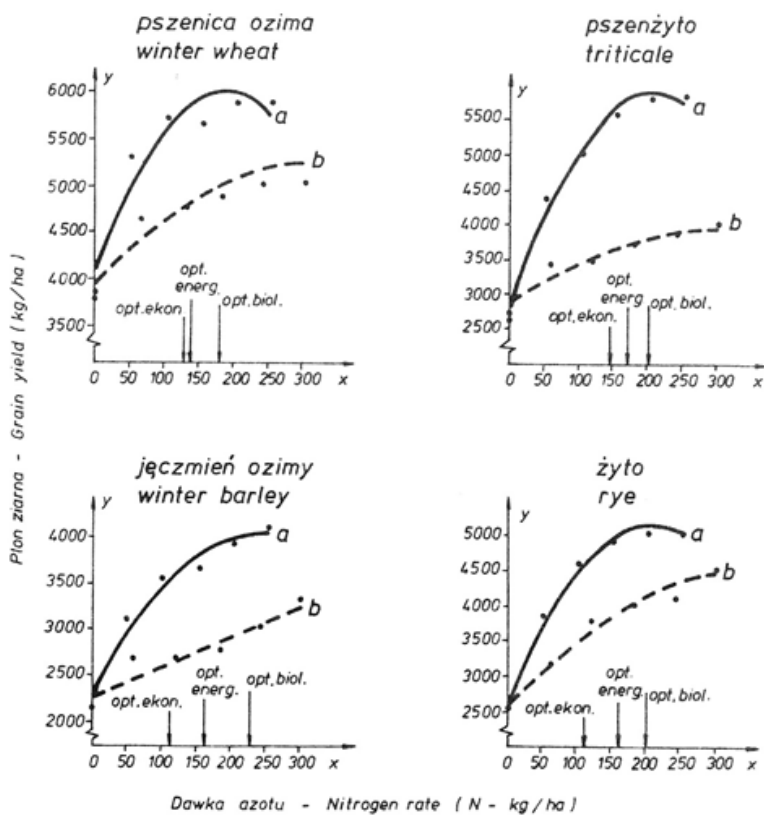
Rys. 3. Plony ziarna jęczmienia po różnych przedplonach

Źródło: Fotyma i Pętkowski, 1981 (19)

Optymalne dawki azotu pod jęczmień jary wyniosły od  $28 \text{ N} \cdot \text{ha}^{-1}$  po przedplonie nawożonym największą dawką tego składnika, do  $52 \text{ N} \cdot \text{ha}^{-1}$  pod przedplon, pod który stosowano dawkę najmniejszą. Efekt następczy azotu był zatem wyraźny, zwłaszcza w latach następujących po obfitującym w opady okresie jesienno-zimowym. Wyniki tych doświadczeń wskazywały wprawdzie na konieczność uwzględnienia w nawożeniu azotem efektu następczego tego składnika, jednak nie dawały wyraźnych zaleceń nawozowych.

### Wyznaczenie równoważników nawozowych azotu stosowanego pod przedplon

W latach 1986–1989 w czterech zakładach doświadczalnych IUNG, na bazie wieloletnich doświadczeń płodozmiennych, przeprowadzono badania nad wyznaczeniem równoważnika nawozów azotowych stosowanych pod różne rośliny uprawiane w dwupolowych członach płodozmianu norfolkiego (15). Duże poletka dzielono na dwie części i na każdej z nich stosowano przemiennie, co dwa lata, sześć dawek nawozów azotowych. W pierwszym roku badano tzw. czysty efekt działania tych nawozów, a w roku drugim – efekt następczy. Wyniki, dla obydwu lat oddzielnie, opracowane z zastosowaniem ciągłych krzywych regresji przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 1. Krzywe reakcji zbóż ozimych na bezpośrednie (a) i następcze (b) działanie nawożenia azotem  
Direct effect (a) and residual effect (b) of nitrogen fertilization in winter cereals

pszenica	a:	$y = 4092 + 21,100 x - 0,058 x^2$
wheat	b:	$y = 3944 + 9,067 x - 0,016 x^2$
pszenżyto	a:	$y = 2799 + 30,320 x - 0,074 x^2$
triticale	b:	$y = 2874 + 6,900 x - 0,011 x^2$
jęczmień	a:	$y = 2268 + 15,300 x - 0,033 x^2$
barley	b:	$y = 2277 + 3,167 x$
żyto	a:	$y = 2635 + 24,920 x - 0,061 x^2$
rye	b:	$y = 2602 + 10,283 x - 0,013 x^2$

Rys. 4. Krzywe reakcji zbóż ozimych na bezpośrednie (a) i następcze (b) działania azotem  
Źródło: Fotyma i in., 1992 (15)

Z równań regresji dla następczego działania azotu wyznaczono wielkość plonów roślin dla kolejnych dawek N (z poprzedniego roku), a następnie wartości te podstawiono do równań regresji dla bezpośredniego działania azotu. Dawkę azotu w działaniu bezpośrednim Y, umożliwiającą uzyskanie takiego samego plonu jak w działaniu następczym X, wyliczano z równania regresji prostej:  $Y = a + bX$ .

Dla dawki  $X = 100 \text{ kg N} \cdot \text{ha}^{-1}$  w działaniu następczym wartość  $Y$  odpowiada równoważnikowi nawozowemu azotu stosowanego pod przedplon. Wartości te, zależnie od uprawianej rośliny i jej przedplonu, wynosiły od 20 do 35 kg. W wymiarze praktycznym oznacza to, że na każde 100 kg azotu zastosowanego pod przedplon, dawka składnika pod roślinę następczą może być obniżona o taką właśnie ilość azotu w nawozach. Wartość równoważników nawozowych azotu stosowanego pod przedplon waha się w szerokich granicach, zależnie od gatunków roślin, rodzaju gleby i ilości opadów w sezonie jesienno-zimowym. Podane wartości równoważnika należy zatem traktować orientacyjnie. Tym niemniej koncepcja tego równoważnika wydawała się obiecująca i w dalszych badaniach zastosowano ją w odniesieniu do azotu w nawozach naturalnych, azotu mineralnego w glebie, a nawet azotu atmosferycznego wiążanego przez rośliny bobowate.

### Wykorzystanie azotu z nawozów

Oszacowanie stopnia wykorzystania azotu z nawozów wymaga dysponowania danymi o zawartości tego składnika w biomase roślin. Dlatego w materiale roślinnym pochodzącym z doświadczeń wieloletnich, prowadzonych w latach 1986–1989 w czterech zakładach doświadczalnych IUNG, oznaczono zawartość azotu w plonach głównych roślin uprawianych w zmianowaniach, a następnie wyliczono pobranie azotu z plonem. Uzyskane wyniki posłużyły do opracowania trzyczęściowych diagramów efektywności nawożenia zbóż tym składnikiem i obliczenia optymalnej rolniczo dawki azotu.

Wykorzystanie azotu z nawozów można określić metodą izotopową z zastosowaniem  $^{15}\text{N}$  lub metodą różnicową. Zastosowanie pierwszej z metod, ze względu na koszty nawozów wzbogaconych izotopem, ogranicza się zwykle do doświadczeń wazonowych. Za pomocą metody różnicowej określa się natomiast wykorzystanie azotu z nawozów w doświadczeniach polowych.

W Zakładzie Żywienia Roślin i Nawożenia za pomocą metody izotopowej, a konkretnie metody rozcieńczenia izotopowego, określano stopień wykorzystania azotu z nawozów mineralnych przez rośliny bobowate (21), pszenicę ozimą (26) oraz mieszanki zbożowo strączkowe (28). Metoda ta pozwala na precyzyjne oszacowanie rzeczywistej ilości pobranego przez roślinę azotu pochodzącego z zastosowanych nawozów znakowanych izotopem  $^{15}\text{N}$ . Umożliwia ona również śledzenie szlaku przemieszczania azotu w układzie gleba–roślina.

Wykorzystanie azotu z nawozów według metody różnicowej wylicza się ze wzoru:

$$E_N = (P_N - P_0) / N \cdot 100$$

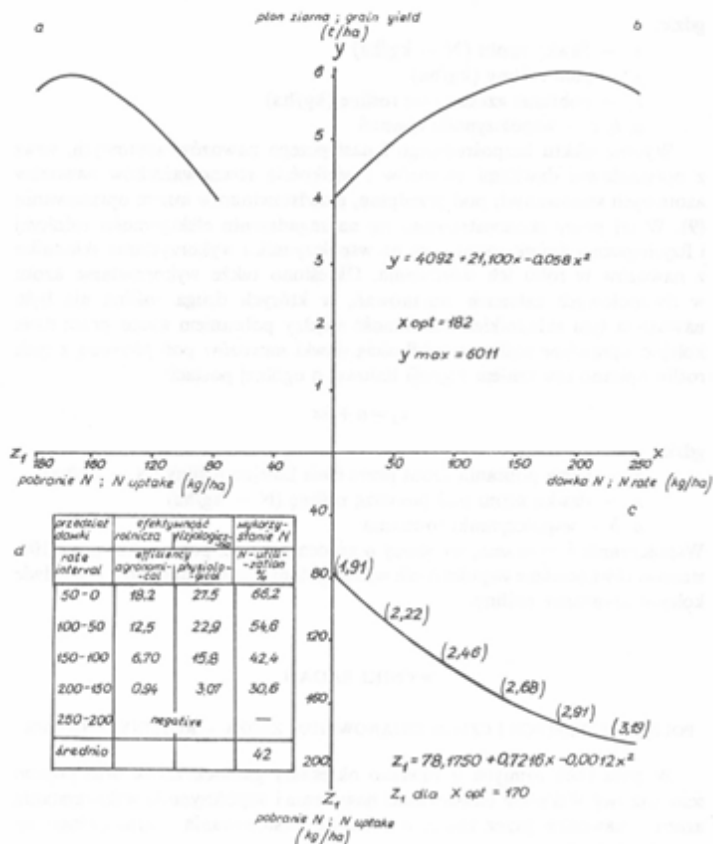
gdzie:

$P_N$  i  $P_0$  – pobranie azotu z plonem rośliny, odpowiednio w obiekcie nawożonym i nienawożonym;

$N$  – dawka azotu.



Dysponując trzyczęściowym diagramem efektywności nawożenia, wykorzystanie azotu można wyliczyć jako iloraz efektywności rolniczej i efektywności fizjologicznej (rys. 5) (16).



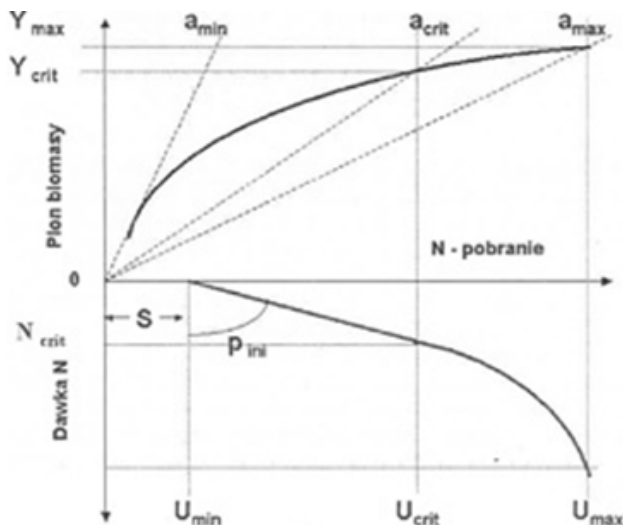
Rys. 1. Wskaźniki efektywności nawożenia i wykorzystania azotu z nawozów przez pszenicę ozimą  
 a – zależność między wielkością plonu i ilością azotu pobranego przez roślinę  
 b – zależność między wielkością plonu i wielkością dawek azotu zastosowanego w nawozie  
 c – zależność między ilością azotu pobranego przez roślinę i wielkością dawek azotu zastosowanego w nawozie; w nawiasie pobranie N na 100 kg plonu ziarna zbóż + odpowiednia ilość słomy  
 d – efektywność rolnicza, fizjologiczna i wykorzystanie N z nawozów w roku ich zastosowania

The efficiency of nitrogen fertilization and N-utilization for winter wheat  
 a – the relation between the yield and nitrogen uptake  
 b – the relation between the yield and nitrogen doses  
 c – the relation between nitrogen uptake and nitrogen doses; in parenthesis N uptake for 100 kg of grain + corresponding yield of straw  
 d – agronomical and physiological nitrogen efficiency and N-utilization in the 1st year

Rys. 5. Wskaźniki efektywności nawożenia i wykorzystania azotu z nawozów przez pszenicę ozimą  
 Źródło: Fotyma i in., 1992 (16)

Wyniki statycznych doświadczeń prowadzonych w dwóch zakładach doświadczalnych IUNG w latach 1993–2005 (13, 14) posłużyły również do parametryzacji modelu QUADMOM. Z modelu tego można wyliczyć, oprócz wykorzystania azotu z nawozów, szereg wskaźników dotyczących efektywności

nawożenia azotem, jak:  $N_{crit}$  – optymalna dawka nawozów;  $U_{crit}$  – optymalne pobranie azotu z plonem;  $Y_{crit}$  – potencjalny plon rośliny;  $U_{min}$  – pobranie azotu z gleby;  $a_{crit}$  – krytyczne stężenie azotu w roślinie nielimitujące plonu;  $p_{ini}$  – wykorzystanie azotu z nawozów (rys. 6).



Rys 6. Schemat modelu QUADMÓD

Źródło: Fotyma i in., 2006 (14)

### Testy glebowe zawartości azotu

W przedstawionych dotychczas badaniach koncentrowano się na funkcjach produkcji jako podstawie wyznaczania optymalnych dawek nawozów azotowych pod rośliny uprawy polowej. W latach 90. XX w. rozpoczęto badania nad przydatnością testu azotu mineralnego  $N_{min}$  do określania wielkości pogłównych dawek tych nawozów. Do tego celu wykorzystano doświadczenia polowe, prowadzone w cyklach dwuletnich, w czterech Zakładach Doświadczalnych IUNG (8, 9) oraz doświadczenia prowadzone w dwóch Zakładach Doświadczalnych IUNG w latach 1994–1999, w zmianowaniach czteropolowych, w których stosowano sześć dawek nawozów azotowych (12). W trakcie tych badań dokonano uściślenia metodyki pobierania, przechowywania i analizowania próbek gleby. Podjęto również próbę połączenia trzyczęściowych funkcji produkcji z zawartością azotu mineralnego w jeden spójny model służący określeniu wielkości optymalnych dawek nawozów azotowych pod zboża (20), sprowadzając go do następującego równania:

$$N_{opt} = ((Y_{opt} \times a_{crit}) - (N_{min} \times wp_{min})) \times wp_N$$

gdzie:

$Y_{opt} \times a_{crit}$  – przewidywane pobranie azotu z plonem rośliny;

$wp_{min}$  – równoważnik nawozowy azotu glebowego;

$wp_N$  – współczynnik wykorzystania azotu z nawozów.

Wykorzystanie tego modelu opiera się na oznaczeniu zawartości  $N_{\min}$  w glebie na określonym polu, a wiele zawartych w nim parametrów ma charakter szacunkowy. Parametry te muszą być określane na podstawie odpowiednio licznych ścisłych doświadczeń polowych, co wiąże się z dużymi nakładami pracy i środków. Dlatego dla uproszczenia systemu doradztwa dokonano kalibracji testu  $N_{\min}$ , wyznaczając przedziały jego zawartości odpowiadające stanowi zaopatrzenia roślin w azot mineralny pochodzący z gleby. Dla kompatybilności tego testu z testami na zawartość przyswajalnych form fosforu, potasu, magnezu oraz przedziałami potrzeb wapnowania, z góry założono pięć przedziałów zawartości azotu mineralnego w profilu glebowym.

U schyłku lat 90. XX w. rozpoczęto badania monitoringowe nad zawartością azotu mineralnego w glebach Polski. W latach 1997–2003, w około 5100 punktach zlokalizowanych na obszarze całej Polski, pod nadzorem metodycznym IUNG, okręgowe stacje chemiczno-rolnicze pobierały dwukrotnie w ciągu roku – wiosną i jesienią, próby z profilu glebowego 0–90 cm podzielonego na trzy warstwy. W próbach gleby oznaczano zawartość azotu amonowego i azotanowego, a następnie zawartość tą przeliczano na kilogramy azotu w określonej warstwie gleby oraz w całym profilu glebowym. Oznaczeń zawartości azotu mineralnego dokonywały okręgowe stacje chemiczno-rolnicze. Jako przeciętną miarę zawartości azotu w próbach gleby, przyporządkowanych do grup wydzielonych na podstawie składu granulometrycznego przyjęto medianę, a jako miarę rozproszenia – percentylowy rozkład danych (tab. 3). Na podstawie przeprowadzonych badań monitoringowych wyznaczono klasy zawartości azotu w glebie w terminie wiosennym i jesiennym. Zawartość azotu w okresie wiosny posłużyła do sformułowania zaleceń nawozowych, a w okresie jesieni – do oceny ryzyka zagrożenia środowiska glebowego nadmiarem azotu mineralnego.

Tabela 3

Klasy zawartości azotu mineralnego w profilu 0–90 cm gleby w okresie wiosny ( $\text{kg N} \cdot \text{ha}^{-1}$ )

Kategoria agronomiczna gleby	Klasa zawartości azotu mineralnego w $\text{kg N}_{\text{NO}_3} + \text{N}_{\text{NH}_4}$ w $\text{kg N} \cdot \text{ha}^{-1}$				
	bardzo mała	mała	średnia	duża	bardzo duża
Bardzo lekka	<40	41–55	56–73	74–101	>101
Lekka	<51	52–70	71–90	91–123	>123
Średnia	<58	59–79	80–103	104–139	>139
Ciężka	<61	62–83	64–107	108–145	>145

Źródło: Fotyma i in. 2004 (17)

### Test zawartości azotu we wskaźnikowych częściach roślin

W latach 80. XX w., w czterech Zakładach Doświadczalnych IUNG (19) przeprowadzono serię trzydziestu ośmiu doświadczeń polowych z żytem, pszenicą ozimą, jęczmieniem jarym i owsem w celu kalibracji testu zawartości azotu ogólnego w roślinach. Schemat dwuczynnikowych doświadczeń obejmował pięć poziomów

podstawowego nawożenia zbóż azotem – przewidziane pod zboża jare i po ruszeniu wegetacji pod zboża ozime oraz pięć dawek nawozów azotowych stosowanych pogłównie w fazie strzelania w źdźbło (tab. 4).

Tabela 4

Rozkład i wielkość dawek nawozów azotowych pod zboża

Podstawowa	Dawki nawozów azotowych (kg N·ha <sup>-1</sup> )				
	pogłównie				
0	0	40	80	120	160
40	0	40	80	120	-
80	0	40	80	-	-
120	0	40	-	-	-
160	0	-	-	-	-

Źródło: Chojnacki i Fotyma, 1981 (4)

Próby roślin pobierano od fazy 5–6 liścia do początku fazy kłoszenia w odstępach 10 dniowych, mierzono ich wysokość, a następnie analizowano zawartość azotu ogólnego w materiale roślinnym. Wielkość plonu ziarna korelowano z zawartością azotu w poszczególnych fazach rozwojowych. Na podstawie uzyskanych wyników stwierdzono, że do diagnozowania stanu zaopatrzenia zbóż w azot najbardziej miarodajna jest faza strzelania w źdźbło, a zawartości poniżej 3,0% w suchej masie wskazują na niedostateczne zaopatrzenie roślin zbożowych w ten składnik. Krytyczna zawartość azotu w fazie strzelania w źdźbło związana jest ponadto z wysokością roślin, dlatego w przypadku gdy wysokość odbiega od uznanej za normalną, należy zastosować uzupełniającą dawkę azotu w celu skorygowania zawartości N w roślinach.

W latach 1981–1984 w czterech Zakładach Doświadczalnych IUNG przeprowadzono doświadczenia o podobnym schemacie, których celem było wyznaczenie krytycznej zawartości azotu w roślinach rzepaku (6). Próby roślin pobierano w pięciu fazach rozwojowych, określano ich suchą masę oraz zawartość azotu ogólnego. Krytyczną zawartość azotu w nadziemnych częściach roślin wyznaczono metoda krzywych granicznych oraz po raz pierwszy w Polsce, według równania Greenwooda, opisującego zależność krytycznej zawartości azotu od suchej masy roślin:

$$N_c = 1,35(1 + 3 \exp) - 0,26 W$$

gdzie:

$N_c$  = krytyczna zawartość azotu w nadziemnej masie roślin (%);

$W$  = sucha masa nadziemnych części roślin (t·ha<sup>-1</sup>).

### Testy roślinne NNI, SPAD, NDVI

Pod koniec lat 90. XX w. rozpoczęto badania nad oceną stanu odżywienia roślin azotem, opierając się na koncepcji „nitrogen nutrition index” (NNI) oraz testu pośredniego SPAD (9, 18). Test NNI opiera się na wspomnianej wyżej koncepcji

Greenwooda, zgodnie z którą istnieje ścisła zależność o charakterze prawa biologicznego pomiędzy zawartością azotu w roślinie a ilością nagromadzonej przez nią suchej masy. Znając zatem suchą masę roślin, możliwe jest wyznaczenie krytycznej zawartości azotu w częściach nadziemnych w czasie wegetacji. Stosunek obliczonej w ten sposób zawartości krytycznej do aktualnej zawartości azotu w roślinie stanowi indeks stanu odżywienia roślin – NNI. Wartość tego indeksu bliska 1 określa optymalny stan odżywienia roślin tym składnikiem, a wartości niższe lub wyższe świadczą odpowiednio o odżywieniu niedostatecznym lub luksusowym pobieraniu azotu. Wadami tego testu, podobnie zresztą jak innych roślinnych testów azotu, jest duża zmienność wartości NNI w obrębie pola oraz pracochłonność związana z pobieraniem prób roślinnych. Generalną wadą wszystkich roślinnych testów azotu jest trudność przełożenia ich wyników na wielkość zalecanej pogłównie dawki nawozów azotowych.

Dla uniknięcia tej trudności, podjęto próby zastosowania w warunkach Polski testu pośredniego SPAD. W teście tym wykorzystuje się zależność pomiędzy indeksem zieloności liścia, a w praktyce – zawartości chlorofilu i adsorpcji przez rośliny światła o określonej długości fali. Różnica absorpcji światła przy długościach fali 650 nm i 940 nm stanowi indeks SPAD i mierzona jest za pomocą aparatu optycznego zwanego N-Testerem. Badania nad przydatnością tego podejścia podjęto w IUNG-PIB na początku XXI wieku. Test wymagał kalibracji polegającej na wyznaczeniu wartości indeksu SPAD przy określonym stanie odżywienia roślin azotem. Kalibracji dokonano na podstawie doświadczeń polowych z różnymi roślinami (11, 24). Test SPAD opiera się na pomiarze adsorpcji światła i jest wykonywany na pojedynczych liściach roślin. Uogólnienie indeksu SPAD na całe pole wymaga dokonania wielu pomiarów na roślinach wybranych subiektywnie w różnych jego punktach, co poddaje w wątpliwość przydatność tego testu w warunkach praktycznego rolnictwa. Pewnym rozwiązaniem tego problemu jest pomiar odbicia światła od określonej powierzchni łąnu roślin i wyznaczenie tzw. indeksu wegetacji NDVI. Indeks NDVI wyliczany jest ze wzoru:

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

gdzie:

R – pomiar ilości światła w spektrum światła czerwonego;

NIR – pomiar ilości światła w spektrum podczerwieni.

Pomiaru wartości NDVI dokonywano z zastosowaniem spektrometru GreenSeeker wyposażonego we własne źródło światła o długościach fali 656 i 770 nm. Badania były prowadzone w dwóch statycznych doświadczeniach polowych, łącznie z pomiarami wartości SPAD i indeksu NNI. Umożliwiło to porównanie trzech testów roślinnych azotu. Pewną wadą testu NDVI jest konieczność uwzględnienia stopnia pokrycia powierzchni pola przez łąn roślin, a więc dokonania równoległego pomiaru wartości LAI (indeks powierzchni liści) (24).

W okresie ostatnich 20 lat upowszechnia się nowy paradygmat badań nad nawożeniem azotem. Paradygmat ten wynika z kilku podstawowych przesłanek: konieczności ochrony gleb, wód i powietrza przed nadmiarem nieorganicznych związków azotu, upowszechniania zasad tzw. rolnictwa precyzyjnego i postępu technicznego w zakresie maszyn do wysiewu nawozów wyposażonych w GPS i czujniki spektrometryczne do określania aktualnego indeksu wegetacyjnego ładu roślin oraz postępu w technologii produkcji nawozów azotowych i wieloskładnikowych, uwzględniającego regulację dostępności składników pokarmowych w okresie wegetacji roślin (25–27).

### **Innowacje na rynku nawozów azotowych w Polsce**

Historia polskiego przemysłu nawozowego rozpoczęła się w podtarnowskich Mościcach, w 1930 r., wraz z otwarciem Państwowej Fabryki Nawozów Azotowych. Kolejnym krokiem było połączenie jej z poniemieckimi zakładami na terenie Chorzowa, w wyniku czego powstały Zjednoczone Fabryki Związków Azotowych w Mościcach i Chorzowie, którymi kierował Eugeniusz Kwiatkowski. Jednak gwałtowny rozwój tego segmentu nastąpił po wojnie, kiedy to wznowiły swoją działalność fabryki w Mościcach i w Chorzowie. Powstały ponadto nowe zakłady – we Włocławku (Zakłady Azotowe „Włocławek”, obecnie Anwil S.A.), w Policach (Zakłady Chemiczne „Police” S.A., obecnie Grupa Azoty Zakłady Chemiczne „Police” S.A.), w Kętrzynie (Zakłady Przemysłu Azotowego „Kętrzyn”, obecnie Grupa Azoty Zakłady Azotowe „Kętrzyn” S.A.) oraz w Puławach (Zakłady Azotowe „Puławy”, obecnie Grupa Azoty Zakłady Azotowe „Puławy” S.A.).

W 1948 r. komunistyczny rząd zdecydował o utworzeniu Zakładów Przemysłu Azotowego „Kętrzyn”. W kolejnych latach uruchomiono instalację ciągu nawozowego, m.in. amoniaku, kwasu azotowego i saletrzaku. Zapotrzebowanie rolnictwa polskiego na nawozy mineralne ciągle rosło, dlatego 19 grudnia 1960 r. uchwałą Rady Ministrów, zapadła decyzja o lokalizacji fabryki nawozów azotowych w Puławach, której zadaniem miała być produkcja saletry amonowej metodą wieżową (saletry priloowanej). W 1987 r. powstała w Kętrzynie druga linia nawozów azotowych oraz instalacja mocznika.

Pierwszymi nawozami azotowymi produkowanymi w kraju były saletrzak i mocznik.

Mocznik to nawóz w postaci białych granulek, rozpuszczalny w wodzie, zawierający 46% azotu w formie amidowej, która jest łatwo pobierana przez rośliny pozakorzeniowo (dolistnie). Pobieranie mocznika przez korzenie roślin zachodzi wolniej, ponieważ nawóz ten przechodzi w glebie, w wyniku hydrolizy enzymatycznej, w formę amonową, a następnie azotanową. Wadą tradycyjnego mocznika jest jednak wielkość granulek, dlatego w drugiej dekadzie XXI wieku, Grupa Azoty Zakłady Azotowe „Puławy” S.A. uruchomiła produkcję mocznika metodą rotaformerową, dzięki której uzyskano większe granule, ułatwiając mieszanie z innymi nawozami o podobnym

uziarnieniu i gęstości nasypowej. Mocznik uzyskany tą metodą produkowany jest pod nazwą PULGRAN® oraz PULGRAN®S. PULGRAN®S, powstający ze stopu mocznika i siarczanu amonu, zawiera dodatkowo 8,4% siarki w formie siarczanowej.

Zastosowanie mocznika jako składnika stałych nawozów wieloskładnikowych daje możliwości uzyskania wysokiej, łącznej zawartości składników pokarmowych. W związku z tym, podejmowano w przeszłości próby uruchamiania produkcji nawozów wieloskładnikowych z udziałem mocznika, na przykład wytworzenia nawozów z wykorzystaniem superfosfatów i mocznika. Ze względu na dużą zawartość wody w superfosfatach, która uwalniała się w wyniku reakcji z mocznikiem, powodując upłynnianie granulowanych mieszanin (2), próby te kończyły się niepowodzeniem. Znaczne usprawnienie procesów wytwarzania nawozów zawierających mocznik i składniki superfosfatów nastąpiło w wyniku prac koordynowanych przez Grande Paroisse (obecnie Borealis), efektem których jest technologia wytwarzania nawozów typu UPS (urea – superphosphate) (2, 23). Ze względu na pewne ograniczenia wynikające z doboru odpowiednich surowców fosforytowych czy dodatkowe operacje technologiczne, związane chociażby z budową dodatkowych magazynów, technologia ta uniemożliwia produkcję nawozów w sposób ciągły.

Obecnie prace badawczo-rozwojowe zmierzają w kierunku otrzymania mocznika z inhibitorami ureazy. Celem tych działań jest sprostanie uwarunkowaniom prawnym. W 2016 r. weszła w życie dyrektywa w sprawie redukcji emisji niektórych rodzajów zanieczyszczeń atmosferycznych (5), która zmienia pułapy emisji przemysłowych, w tym amoniaku. Dyrektywa zobowiązuje wszystkie państwa członkowskie Unii Europejskiej do zmniejszenia emisji amoniaku o 1% w ciągu każdego roku od 2020 do 2029 r., natomiast w 2030 r. o 17%. Sugerowanymi możliwościami redukcji strat azotu pochodzących z nawozów mineralnych jest wykorzystywanie nawozów o spowolnionym lub kontrolowanym uwalnianiu składników pokarmowych bądź zastąpienie mocznika nawozami saletrzanymi. W dniu 4 czerwca 2020 r. Sejm RP przyjął ustawę o zmianie ustawy o nawozach i nawożeniu oraz o Państwowej Inspekcji Ochrony Roślin i Nasiennictwa (30). W artykule 20b ustawa zabrania stosowania mocznika w formie granulowanej, z wyłączeniem stosowania mocznika w formie granulowanej zawierającego inhibitor ureazy albo powłokę biodegradowalną.

Saletrzak to nazwa handlowa mineralnych nawozów azotowych zawierających 27,5% azotu w formie azotanu amonu z dodatkiem mielonego wapnia (saletrzak wapniowy) lub dolomitu (saletrzak magnezowy). Od końca lat 60. XX w. jest to jeden z najchętniej stosowanych przez rolników nawozów azotowych. Obecny na rynku Salmag® zawiera oprócz azotu w formie azotanowej i amonowej, 3% wapnia rozpuszczalnego w wodzie i 4% magnezu rozpuszczalnego w wodzie. Zawartość dwóch form azotu czyni z Salmag® nawóz uniwersalny w polskich warunkach glebowo-klimatycznych.

Rozwój nawozów saletrzanych zmierzał w kierunku wprowadzenia do nich dodatkowych składników II-rzędowych. W wyniku prac technologicznych

wprowadzono na rynek Saletrzak 27 standard z borem oraz Salmag S (saletrzak z siarką). Odpowiednikami nawozów saletrzanych z Grupy Azoty są nawozy Canwil i Canwil S produkowane przez Anwil S.A. Rozwój nawozów saletrzanych zmierza w kierunku dodawania do nich mikroelementów. W 2019 r. opracowano w Instytucie Nowych Syntezy Chemicznych w Puławach, nowe formuły nawozów z miedzią i cynkiem, na nośnikach zeolitowych lub polikwasach asparaginowych.

Pod koniec lat 80. w Zakładach Azotowych „Puławy” S.A. wyprodukowano kolejny nawóz – roztwór saletrzano-mocznikowy (RSM). Jest to wysokoskoncentrowany nawóz azotowy wytwarzany w trzech wersjach: 28% N, 30% N oraz 32% N, zawierający wszystkie dostępne formy azotu – azotanową, amonową i amidową. Jego płynna forma umożliwia równomierne rozproszczenie na powierzchni pola, co czyni ten nawóz wysoce skutecznym w warunkach suszy.

Od 2010 r. Grupa Azoty Zakłady Azotowe „Puławy” S.A. realizowała inwestycję w Nowy Kompleks Nawozowy, przygotowując się do uruchomienia produkcji nowych nawozów typu PULGRAN® S i PULASKA i RSMS. Produkty te stanowią odpowiedź na zapotrzebowanie rolników na nawozy zawierające dwa składniki pokarmowe – azot oraz siarkę, w związku z udokumentowanymi niedoborami siarki w glebach Polski. Grupa płynnych nawozów azotowo-siarkowych typu PULASKA® i RSMS o zawartości 20–26% azotu oraz 3–6% siarki to produkty o nowym składzie i znacznie korzystniejszej koncentracji składników pokarmowych w porównaniu z wytwarzanymi dotychczas na polskim rynku nawozami jednoskładnikowymi, tj. mocznik i siarczan amonu. Obecność trzech związków chemicznych azotu: mocznika, azotanu amonu i siarczanu amonu w jednym nawozie pozwala na ograniczenie wad zarówno samego mocznika (straty azotu w postaci amoniaku), jak i siarczanu amonu (kwaśny charakter nawozu oraz wysoka zawartość siarki w stosunku do potrzeb pokarmowych roślin), stosowanych jako odrębne nawozy jednoskładnikowe.

Na zakończenie warto wspomnieć o nawozach azotowych, których dodatkiem są związki stymulujące wzrost systemu korzeniowego roślin, np. kwasy humusowe, zwiększających efektywność pobierania azotu z gleby przez rośliny czy płynne nawozy zawierające aminokwasy o działaniu usprawniającym szlaki metabolizmu azotu w roślinie.

## Podsumowanie

W opracowaniu dokonano podsumowania dorobku IUNG-PIB w zakresie klasycznego podejścia do nawożenia azotem, z wykorzystaniem specjalnie zaprojektowanych, często unikalnych schematów doświadczeń polowych. W badaniach tych stosowano różne podejścia do optymalizacji dawek nawozów azotowych, od funkcji produkcji po testy glebowe i roślinne. Dla wyznaczenia parametrów funkcji produkcji i przedziałów wartości glebowych i roślinnych testów azotu konieczne było prowadzenie licznych doświadczeń polowych o złożonych niekiedy schematach. W szczytowym okresie tego etapu badań prowadzono w Zakładzie Nawożenia IUNG



po kilkadziesiąt, do kilkuset doświadczeń 2–4-letnich i po kilkanaście doświadczeń wieloletnich. Z tych ostatnich przetrwały do dzisiaj jedynie dwa doświadczenia statyczne. Innowacje w zakresie badań nad azotem w IUNG były odzwierciedleniem zmian i tendencji na rynku nawozów azotowych w Polsce oraz zmieniających się wyzwań i priorytetów rozwoju społeczeństwa i gospodarki.

## Literatura

1. Adamus M., Boratyński B., Kozłowska H., Kuleszyński R.: Wyniki doświadczeń polowych z wysokimi dawkami azotu, fosforu i potasu, prowadzonych w Państwowych Technikach Rolniczych. Część I. Efektywność nawożenia zbóż. Pamiętnik Puławski, 1969, **37**: 43-68.
2. Archard P., Schwob Y., Limousin L.: A new route for urea superphosphate fertilizers. Phosphorus and Potassium, 1994, **191**: 27-33.
3. Boguszewski W., Ruszkowski M.: Nawożenie zbóż dużymi dawkami nawozów mineralnych, Wydawnictwo PWRiL, 1968.
4. Chojnacki A., Fotyma E.: Określenie wielkości uzupełniającej dawki azotu pod zboża na podstawie analizy chemicznej materiału roślinnego. Pamiętnik Puławski, 1981, **76**: 107-117.
5. Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2016/2284 z dnia 14 grudnia 2016 r. w sprawie redukcji krajowych emisji niektórych rodzajów zanieczyszczeń atmosferycznych, zmiany dyrektywy 2003/35/WE oraz uchylenia dyrektywy 2001/81/WE (Tekst mający znaczenie dla EOG), Dz.U. UE z 17.12.2016, L 3441/1.
6. Faber A., Chojnacki A., Kryszkowska T.: Określenie wielkości wiosennej dawki azotu pod rzepak na podstawie analizy roślin. Pamiętnik Puławski, 1989, **95**: 109-124.
7. Fotyma E.: Reakcja roślin uprawy polowej na nawożenie azotem. Pamiętnik Puławski, 1988, **93**: 37-60.
8. Fotyma E.: Przydatność glebowego testu  $N_{min}$  w nawożeniu zbóż ozimych. *Fragm. Agron.*, 1995, **12(3)**: 59-78.
9. Fotyma E.: Wykorzystanie glebowych i roślinnych testów do określania potrzeb nawożenia azotem w warunkach zrównoważonego rolnictwa. Pamiętnik Puławski, 2000, **120(I)**: 81-89.
10. Fotyma E.: Zasady nawożenia azotem z wykorzystaniem testów glebowych i roślinnych. Nawozy i Nawożenie – Fertilizers and Fertilization, 2000, **3(4)**: 19-37.
11. Fotyma E., Bezdusznik D.: Wykorzystanie testu NNI i SPAD do oceny stanu odżywienia roślin azotem. Nawozy i Nawożenie – Fertilizers and Fertilization, 2000, **4(5)**: 78-90.
12. Fotyma E., Fotyma M.: Zawartość azotu mineralnego w glebie. Nawozy i Nawożenie – Fertilizers and Fertilization, 2000, **4(5)**: 91-101.
13. Fotyma E., Fotyma M., Filipiak K.: Zastosowanie modelu QUADMÓD do interpretacji wyników doświadczeń z nawożeniem azotem i modelowana potrzeb nawozowych roślin. *Frag. Agron.*, 2000, **71(93)**: 41-48.
14. Fotyma E., Fotyma, M., Filipiak K.: Application of model QUADMÓD for interpretation the results of experiments with spring barley nitrogen fertilization. Nawozy i Nawożenie – Fertilizers and Fertilization, 2006, **3(28)**: 52-60.
15. Fotyma E., Fotyma M., Maćkowiak H.: Wycena efektu bezpośredniego i następczego nawożenia azotem w dwupolowych członach zmianowań. Pamiętnik Puławski, 1992, **100**: 37-60.
16. Fotyma E., Fotyma M., Pietrasz-Kęsik G.: Wykorzystanie azotu z nawozów przez rośliny uprawy polowej. Pamiętnik Puławski, 1992, **101**: 7-34.
17. Fotyma E., Fotyma M., Pietruch C.: Zawartość azotu mineralnego w glebach gruntów ornych w Polsce, Nawozy i Nawożenie 2004, **3(20)**: 11-54.
18. Fotyma E., Pecio A.: Zależność pomiędzy zawartością azotu a nagromadzeniem suchej masy przez zboża. Pamiętnik Puławski, 2000, **114**: 193-100.
19. Fotyma M., Pentkowski A.: Działanie następcze azotu w członie zmianowania rośliny okopowe – jęczmień jary. Pamiętnik Puławski, 1981, **76**: 27-39.

20. Fotyma M.: Zastosowanie testu  $N_{min}$  w doradztwie nawozowym i ochronie środowiska. Nawozy i Nawożenie – Fertilizers and Fertilization, 2004, **3(20)**: 5-10.
21. Kocoń A.: Wykorzystanie przez bobik azotu z mocznika  $^{15}N$  stosowanego dolistnie lub doglebowo. Nawozy i Nawożenie – Fertilizers and Fertilization, 2002, **1(10)**: 293-299.
22. Mazurek J., Ruszkowski M., Witek T.: Produkcyjność pszenicy ozimej i żyta na różnych kompleksach glebowych. Pamiętnik Puławski, 1971, **45**: 55-63.
23. Pat. WO 92/1044 (25.06.1992, zgłoszony 05.12.1990).
24. Pecio A., Fotyma M., Mikołowicz P.: Usefulness of plant tests for evaluation the nitrogen nutritional status of winter wheat and maize. Nawozy i Nawożenie – Fertilizers and Fertilization, 2009, **36**: 5-104.
25. Pecio A., Niedźwiecki J., Debaene G.: Rozpoznanie pola podstawą precyzyjnego nawożenia roślin. Studia i Raporty IUNG-PIB, 2016, **48(2)**: 105-129.
26. Rutkowska A.: Nitrogen study on accumulation and allocation of nitrogen applied at anthesis on top of early nitrogen applications in winter wheat. Journal of Plant Nutrition. 2009, **32(8)**: 1306-132.
27. Rutkowska A.: Productivity, nitrogen use efficiency and water use efficiency of maize for corn in long term field experiment. Polish J. Agron., 2019, **37**: 11-15.
28. Rutkowska A., Pikuła D.: Efficacy of N-nitrogen in fertilization of pea mixtures with wheat, barley, and oats. Plant Soil Environ, 2016, **62(8)**: 367-372.
29. Ten Berge H.F.M., Pikuła D., Goedhart P.W., Schröder J.J.: Apparent nitrogen fertilizer replacement value of grass-clover leys and of farmyard manure in an arable rotation. Part I: grass-clover leys. Soil Use and Management, 2016), **32**: 9-19.
30. Ustawa a dnia 7 maja 2020 r. o zmianie ustawy o nawozach i nawożeniu oraz ustawy o Państwowej Inspekcji Ochrony Roślin i Nasiennictwa, Dz.U.2020.1069

---

*Dziękuję prof. dr hab. Dr. H.C. Mariuszowi Fotymie za pomoc w przygotowaniu historycznej części pracy, dr Alinie Bochniarz za udostępnienie archiwalnych numerów „Pamiętnika Puławskiego” oraz mgr Ewie Decka-Cywińskiej za wsparcie w opracowaniu graficznym.*

---

Adres do korespondencji:

*dr Agnieszka Rutkowska  
Zakład Żywienia Roślin i Nawożenia  
IUNG-PIB  
ul. Czartoryskich 8, 24-100 Puławy  
tel. 81 4786 840  
e-mail: agrut@iung.pulawy.pl*

---

AUTOR	ORCID
Agnieszka Rutkowska	0000-0001-9799-0327