

*Utilization of nitrogen ^{15}N from mineral fertilizers
by components of barley and peas mixtures*Wykorzystanie azotu ^{15}N z nawozów mineralnych przez komponenty mieszanek jęczmienia z grochem siewnym

DOI: 10.15199/62.2024.6.1

In 4 pot expts., mixts. of barley and peas were grown and fertilized with increasing doses of N in the form of $^{15}\text{NH}_4^{15}\text{NO}_3$ of 0.4, 0.8, 1.2 or 1.6 g N/pot, adjusted to the share of peas (33, 57, 75 or 89%) in the mixt. The use of mixt. contg. 33% barley guaranteed the highest uptake of ^{15}N by the seed yield of the mixt. and the highest use of N from fertilizers.

Keywords: cereal-legume mixtures, nitrogen fertilization, ^{15}N isotope dilution method

Założeniem przyjętego przez Unię Europejską planu działań Europejskiego Zielonego Ładu jest zapewnienie zrównoważonego wzrostu gospodarczego, poprawa zdrowia ludzi i jakości życia, większa dbałość o przyrodę, rozwój odnawialnych źródeł energii i zrównoważonych systemów żywnościowych. Jako model produkcji rolnej proponuje się gospodarkę opartą na płodozmianie, ze szczególnym uwzględnieniem roślin bobowatych, uprawianych również w siewach mieszanych. Uprawa zbóż i drobnonasiennych roślin bobowatych jest stosowaną powszechnie praktyką mającą na celu uzyskanie stabilnych plonów, przy równoczesnym zachowaniu bioróżnorodności¹⁻⁴. Znaczącą korzyścią

Przedstawiono wyniki badań wazonowych nad akumulacją oraz wykorzystaniem azotu (^{15}N) przez mieszanki jęczmienia z grochem zależnie od procentowego udziału obu komponentów w mieszance w kontekście ograniczenia zużycia nawozów azotowych oraz ryzyka rozpraszania tego składnika w środowisku. W doświadczeniu stosowano wzrastające dawki azotu w formie $^{15}\text{NH}_4^{15}\text{NO}_3$: 0,4, 0,8, 1,2, 1,6 g N/wazon dostosowane do udziału grochu (33, 57, 75 i 89%) w mieszance. Współczynnik wykorzystania azotu (^{15}N ut) przez jęczmień w fazie kłoszenia był porównywalny między poszczególnymi mieszankami i osiągał średnio 47%. Wartość ^{15}N ut wyznaczona dla grochu wzrastała wraz ze zwiększaniem udziału tej rośliny w mieszance i wyniosła odpowiednio 4,3, 15, 23 i 44%. W fazie pełnej dojrzałości jęczmień wykorzystał azot pochodzący w nawozów średnio w 54%, a groch w 8–46%, zależnie od ilości roślin w mieszance.

Słowa kluczowe: mieszanki zbożowo-strączkowe, nawożenie azotem, metoda rozcieńczenia izotopowego ^{15}N

z uprawy mieszanek zbożowo-strączkowych jest ograniczenie zużycia nawozów azotowych^{5,6}. Zgodnie z aktualnymi doniesieniami⁷ większa efektywność wykorzystania azotu w siewach mieszanych w skali globalnej może zmniejszyć zapotrzebowanie na syntetyczne nawozy azotowe o ok. 26%. Należy jednak mieć na uwadze, że uprawa mieszanek z roślinami bobowatymi może generować straty azotu, o ile jest on zastosowany w sposób nieuzasadniony⁸⁻¹⁰. Zwyczajowo na glebach mniej zasobnych przedsięwzięcie stosuje się startową dawkę azotu, która ma zapewnić prawidłowy wzrost roślin zbożowych do czasu, kiedy będą mogły korzystać z azotu związanego biologicznie przez roślinę bobowatą. Właściwa dawka azotu uzależniona jest od proporcji obu komponentów w mieszance, należy jednak rozważyć zasadność aplikacji nawozów azotowych w stanowiących, w których wiosną zawartość N_{min} w glebie jest wystarczająca do prawidłowego wzrostu roślin zbożowych. W glebach zasobnych w okresie wiosennym w łatwo dostępny dla roślin azot mineralny, dodatkowa aplikacja nawozów azotowych może generować straty produkcyjne, ekonomiczne i środowiskowe. Ze względu na dobrze udokumentowaną w literaturze preferencję roślin bobowatych w stosunku do azotu mineralnego obecnego w glebie, przy znacznych jego ilościach zmniejsza się efektywność wiązania azotu atmosferycznego przez te rośliny¹¹⁻¹⁴. Z drugiej strony korzystne



Dr hab. Agnieszka RUTKOWSKA (ORCID: 0000-0001-9799-0327) w roku 1997 ukończyła studia na Wydziale Filozofii Katolickiego Uniwersytetu Lubelskiego. W 2005 r. uzyskała stopień doktora nauk rolniczych w dziedzinie agronomii, a w 2022 r. stopień doktora habilitowanego w dziedzinie nauk rolniczych, w dyscyplinie rolnictwo i ogrodnictwo. Jest zatrudniona w Instytucie Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa – Państwowym Instytucie Badawczym w Puławach na stanowisku adiunkta. Specjalność – nawożenie i gospodarka nawozowa.

*** Adres do korespondencji:**

Zakład Żywnienia Roślin i Nawożenia, Instytut Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa – Państwowy Instytut Badawczy, ul. Czartoryskich 8, 24-100 Puławy, tel.: (81) 478-68-40, e-mail: agrut@iung.pulawy.pl

jest, aby azot z nawozów gromadził się w plonie głównym, który wnoszony jest z pola. Ocena stopnia wykorzystania azotu z nawozów mineralnych przez rośliny oraz jego rozdysponowania do poszczególnych organów możliwa jest jedynie z wykorzystaniem metody izotopowej. Z uwagi na koszty związane z zastosowaniem nawozów wzbogaconych izotopem azotu ^{15}N badania prowadzi się zwykle w warunkach doświadczeń wazonowych.

Celem podjętych badań była ocena stopnia wykorzystania azotu pochodzącego z nawozów mineralnych przez komponenty mieszanek jęczmienia z grochem siewnym zależnie od udziału w mieszance rośliny zbożowej i bobowatej, a tym samym zastosowanej dawki nawozów azotowych w czasie wegetacji oraz w fazie pełnej dojrzałości.

Część doświadczalna

Metodyka badań

Dwuletnie doświadczenie wazonowe założono w hali wegetacyjnej Instytutu Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa – Państwowego Instytutu Badawczego w Puławach. Wazony Mitscherlicha wypełniono 6 kg gleby lekkiej zmieszanej z 1 kg piasku. Substrat glebowy charakteryzował się zawartością 0,6 g/kg azotu całkowitego i 6,2 g/kg węgla całkowitego oraz pH_{KCl} równym 6,6. Roślinami uprawianymi w mieszankach był groch siewny (*Pisum sativum* L.) odmiany Basza i jęczmień jary (*Hordeum vulgare* L.) odmiany Muza. Czynnikiem doświadczenia była dawka nawozów azotowych aplikowana w formie saletry amonowej zawierającej izotop azotu ($^{15}\text{NH}_4^{15}\text{NO}_3$), której wielkość dostosowano do procentowego udziału komponentu zbożowego: 0,4 g N/wazon (33-proc. udział jęczmienia), 0,8 g N/wazon (57-proc. udział jęczmienia), 1,2 g N/wazon (75-proc. udział jęczmienia) oraz 1,6 g N/wazon (89-proc. udział jęczmienia). Dawki całkowite N powyżej 0,4 g N/wazon dzielono na dawki cząstkowe po 0,4 g N/wazon. Pierwsza dawka nawozu została zastosowana przed siewem roślin, kolejna w fazie krzewienia jęczmienia, każda następną po siedmiu dniach od poprzedniej. Przed zastosowaniem każdej kolejnej dawki część roślin zbierano w celu określenia zawartości N ogólnego oraz stopnia wzbogacenia materiału roślinnego izotopem azotu ^{15}N . Stąd w kolejnych terminach zbioru, zależnie od udziału komponentów w mieszance, dawki azotu były zróżnicowane (tabela 1).

W czasie wegetacji rośliny były zbierane czterokrotnie: w fazie krzewienia jęczmienia (I zbiór), strzelania w źdźbło (II zbiór), grubienia pochwy liściowej (III zbiór) i kłoszenia (IV zbiór). Terminy kolejnych zbiorów przypadały na następujące fazy rozwojowe grochu: początek wydłużania pędu, koniec wydłużania pędu, pierwszy kwiat otwarty i rozwój nasion.

W fazie pełnej dojrzałości rośliny zostały zebrane, podzielone na ziarno/nasiona,

słomę, osadki kłosa z plewami/strączyzny i korzenie, wysuszone, ważone i przygotowane do analiz chemicznych. Całkowitą zawartość azotu oraz stopień wzbogacenia prób izotopem azotu ^{15}N oznaczono za pomocą analizatora pierwiastkowego PDZ Europa ANCA-GSL połączonego ze spektrometrem mas Sercon 20-20 IRMS (SerCon, Cheshire, UK) w Uniwersytecie Gent, Belgia. Stopień wykorzystania azotu z nawozów określono na podstawie metodyki opisanej przez Hood i Blair^[5] oraz Rutkowską^[6]. Analizy statystyczne przeprowadzono z wykorzystaniem pakietu Statgraphics Centurion 18 Package (Statgraphics Plus, Rockville, USA).

Wyniki badań

Pobranie oraz wykorzystanie azotu przez komponenty mieszanek w czasie rozwoju wegetatywnego

Wartość pobrania całkowitego azotu oraz ^{15}N pochodzącego z nawozów przez komponenty mieszanek wzrastała w kolejnych terminach zbioru. Pobranie azotu przez jęczmień zwiększało się wraz ze wzrostem udziału rośliny zbożowej, a tym samym dawki zastosowanego nawozu (rys. 1a, c, e, g). Pobranie azotu przez groch było tym większe, im większy był udział rośliny bobowatej (rys. 1b, d, f, h). W fazie kłoszenia (IV zbiór) jęczmień pobrał z gleby od 0,44 (w obiekcie z dawką 0,4 g N/wazon) do 1,26 g N/wazon (w obiekcie z dawką 1,6 g N/wazon). Całkowita wartość pobrania azotu przez groch w tym samym terminie i w tych samych obiektach wyniosła odpowiednio 0,9 i 0,13 g N/wazon. Niezależnie od dawki nawozów ^{15}N stanowił połowę całkowitej ilości azotu pobranego przez jęczmień. Udział ^{15}N w całkowitej ilości azotu pobranego przez groch zwiększał się wraz ze zmniejszaniem liczby roślin grochu w wazonie, a tym samym zwiększaniem liczby roślin jęczmienia i poziomu nawożenia N i wyniósł od 22% (dawka 0,4 g N/wazon) do 51% (dawka 1,6 g/wazon).

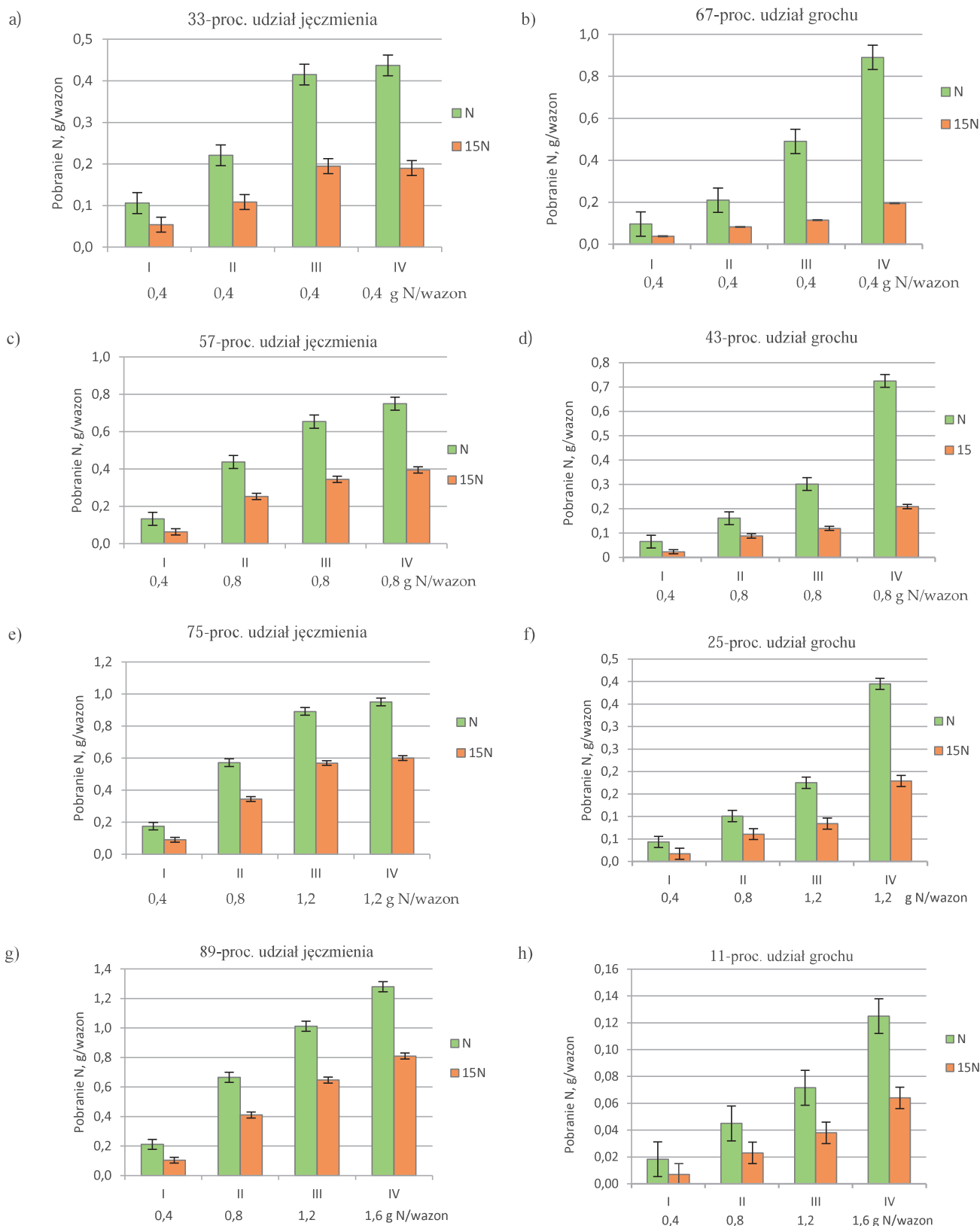
Wykorzystanie azotu przez komponenty mieszanek

Wartość współczynnika wykorzystania azotu (^{15}N) z nawozów mineralnych przez jęczmień w kolejnych terminach zbiorów była porównywalna pomiędzy mieszankami,

Table 1. Nitrogen doses applied before each subsequent harvest of plants depending on the share of components in the mixture

Tabela 1. Dawki azotu zastosowane przed każdym kolejnym zbiorem roślin zależnie od udziału komponentów w mieszance

Udział jęczmienia w mieszance, %	Liczba roślin		Dawka N, g/wazon			
	jęczmień	groch	zbiór I	zbiór II	zbiór III	zbiór IV
33	2	4	0,4	0,4	0,4	0,4
57	4	3	0,4	0,8	0,8	0,8
75	6	2	0,4	0,8	1,2	1,2
89	8	1	0,4	0,8	1,2	1,6



$n = 3$ dla każdego gatunku; 0,4–1,6 g N/wazon – dawki azotu zastosowane przed terminem zbioru, 95% Tukey HSD

Fig. 1. Nitrogen uptake by barley and peas in the subsequent terms of harvests (I–IV)

Rys. 1. Pobranie azotu przez jęczmień i groch w kolejnych terminach zbiorów (I–IV)

co wskazuje na właściwy dobór dawki azotu, uwzględniającej udział rośliny zbożowej w mieszance (tabela 2). W fazie kłoszenia jęczmień wykorzystał 46–48% azotu z nawozów. Wartość ¹⁵Nut oszacowana dla grochu w tym

samym terminie była znacznie mniejsza, niemniej jednak, w przypadku mieszanki z największym (67%) udziałem rośliny bobowatej, wykorzystanie azotu przez groch osiągnęło 44%.

Table 2. Coefficient of nitrogen utilization (¹⁵Nut) by components of barley-peas mixtures

Tabela 2. Współczynnik wykorzystania azotu (¹⁵Nut) przez komponenty mieszanek jęczmienia z grochem

Udział jęczmienia w mieszance, %	I Zbiór		II Zbiór		III Zbiór		IV Zbiór	
	jęczmień	groch	jęczmień	groch	jęczmień	groch	jęczmień	groch
33	8,0 ^{aA} 0,4 g N	9,0 ^{aA} 0,4 g N	27 ^{aB} 0,4 g N	21 ^{aB} 0,4 g N	45 ^{aC} 0,4 g N	29 ^{aC} 0,4 g N	46 ^{aC} 0,4 g N	44 ^{aD} 0,4 g N
57	8,0 ^{aA} 0,4 g N	3,0 ^{bA} 0,4 g N	30 ^{aB} 0,8 g N	11 ^{bB} 0,8 g N	44 ^{aC} 0,8 g N	15 ^{bC} 0,8 g N	47 ^{aC} 0,8 g N	23 ^{bD} 0,8 g N
75	8,0 ^{aA} 0,4 g N	1,0 ^{cA} 0,4 g N	29 ^{aB} 0,8 g N	5,0 ^{cB} 0,8 g N	47 ^{aC} 1,2 g N	8,0 ^{cC} 1,2 g N	47 ^{aC} 1,2 g N	15 ^{cD} 1,2 g N
89	7,0 ^{aA} 0,4 g N	0,4 ^{dA} 0,4 g N	26 ^{aB} 0,8 g N	1,4 ^{dB} 0,8 g N	43 ^{aC} 1,2 g N	2,4 ^{dC} 1,2 g N	48 ^{aD} 1,6 g N	4,3 ^{dD} 1,6 g N

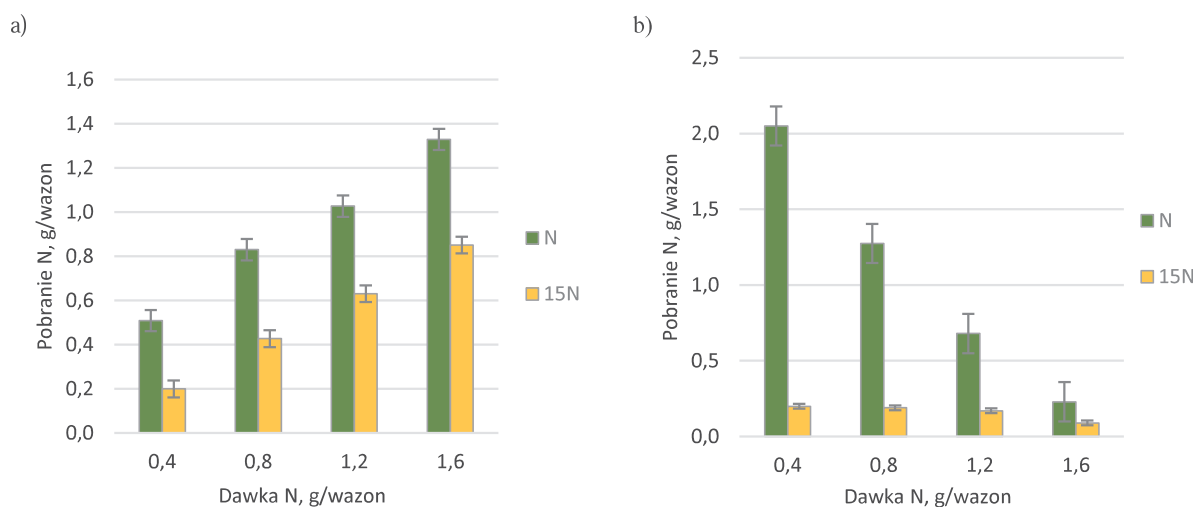
n = 3 dla każdego gatunku w danym terminie, te same litery oznaczają brak różnic istotnych statystycznie (P ≤ 0,05); małe litery odnoszą się do różnic ¹⁵Nut między jęczmieniem/grochem zależnie od udziału w mieszance (pionowo); wielkie litery odnoszą się do różnic ¹⁵Nut między jęczmieniem/grochem zależnie od terminu zbioru (poziomo); 0,4–1,6 g N/wazon – wielkość całkowitej dawki azotu zastosowanej przed kolejnym terminem zbioru

Pobranie i wykorzystanie azotu przez komponenty mieszanek w fazie pełnej dojrzałości

Ilość azotu pobranego przez jęczmień w fazie pełnej dojrzałości zwiększała się wraz ze zwiększaniem udziału komponentu zbożowego w mieszance, a tym samym dawki zastosowanych nawozów (rys. 2). Pobranie azotu przez jęczmień w fazie dojrzałości było o 5–15% większe w stosunku do fazy kłoszenia. W przeciwieństwie do rośliny zbożowej groch pobierał znaczne ilości azotu w okresie pomiędzy fazą początku kwitnienia a fazą dojrzałości fizjologicznej (1,8–2,3 razy więcej), co jest zgodne z danymi literaturowymi wskazującymi, że maksymalna wydajność procesu biologicznego wiązania azotu atmosferycznego zachodzi pomiędzy fazą kwitnienia a wytwarzaniem nasion^{17–19}. Udział ¹⁵N z nawozów mineralnych w całkowitej ilości azotu pobranego z biomasą roślin zwiększał się wraz ze wzrostem dawki N i stanowił 39–64% w przypadku jęczmienia i 17–39% w przypadku grochu. Pozostała część azotu pobranego przez jęczmień pochodziła z puli azotu glebowego. Zważywszy, że gleba wykorzystana w doświadczeniu była uboga w ten pierwiastek, znaczne ilości zakumulowanego przez jęczmień azotu stanowił N₂ biologicznie związanej przez groch^{20–22}.

Przeliczając całkowitą ilość azotu przypadającą na jedną roślinę jęczmienia zależnie od zastosowanej dawki nawozów, wartości pobrania kształtowały się na poziomie 0,12–0,20 g N/roślinę. Ilość azotu z nawozów była stała niezależnie od udziału jęczmienia w mieszance (poziomu nawożenia) i wyniosła 0,11 g ¹⁵N/roślinę. W przypadku grochu zanotowano odmienną zależność, ilość N wzrastała w miarę zwiększania udziału tej rośliny z mieszance z 0,23 g do 0,51 g N/roślinę, natomiast ilość ¹⁵N nieznacznie wahała się w granicach 0,05–0,09 g ¹⁵N/roślinę. Jęczmień korzystał zatem przede wszystkim z azotu pochodzącego z nawozów, natomiast groch z azotu związanego biologicznie. Można zatem uznać, że dawki nawozów były dostosowane do udziału obu komponentów w mieszance, nie ograniczając procesu biologicznej redukcji azotu cząsteczkowego przez roślinę bobowatą.

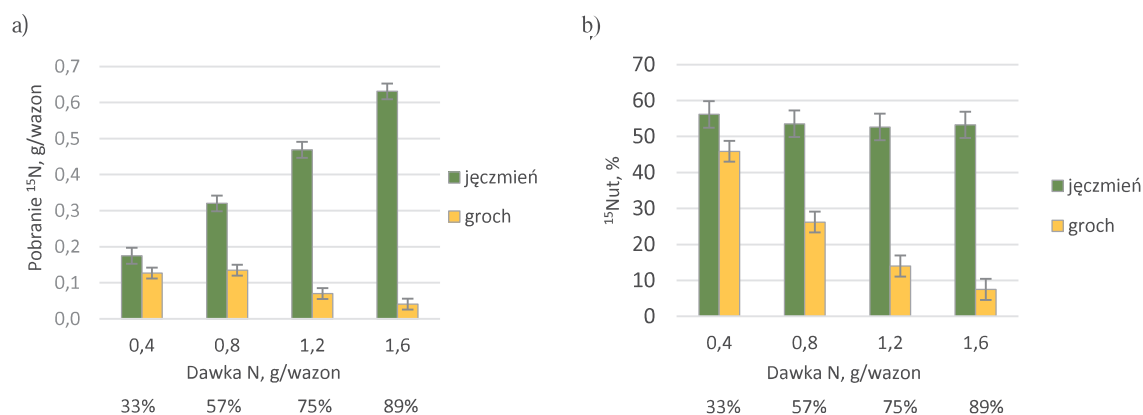
W okresie rozwoju generatywnego akumulacja azotu w biomasie grochu zależy od ilości N₂ związanego biologicznie oraz azotu egzogenego, pochodzącego z gleby i nawozów mineralnych^{23, 24}. Azot pochodzący z redukcji azotu atmosferycznego jest zazwyczaj przemieszczany do rozwijającego się ziarna, podczas gdy azot mineralny podlega rozdysponowaniu między organy wegetatywne i generatywne²⁵. W warunkach prowadzonego doświadczenia wazono-



n = 3 dla każdej cechy; 33–89% udział jęczmienia w mieszance; 95% Tukey HSD

Fig. 2. The uptake of total nitrogen (N) and nitrogen from fertilizers (¹⁵N) by barley (a) and peas (b) depending on the proportion of the cereal component in the mixture

Rys. 2. Pobranie azotu całkowitego (N) i azotu z nawozów (¹⁵N) przez jęczmień (a) i groch (b) zależnie od udziału komponentu zbożowego w mieszance



n = 3 dla każdego gatunku; 33–89% udział jęczmienia w mieszance; 95% Tukey HSD

Fig. 3. The uptake of ¹⁵N by seed yield (a) and the coefficient of nitrogen utilization (¹⁵Nut) by barley and peas (b) depending on the nitrogen rate

Rys. 3. Pobranie azotu ¹⁵N z plonem nasion (a) oraz współczynnik wykorzystania azotu z nawozów (¹⁵Nut) przez komponenty mieszanek (b), zależnie od dawki nawozów

wego groch pobrał w okresie między początkiem kwitnienia a fazą pełnej dojrzałości od 5% ¹⁵N z nawozów mineralnych (z dawki 0,4 g N/wazon) do 40% (z dawki 1,6 g N/wazon).

Pobranie azotu ¹⁵N z plonem nasion obu roślin wzrastało wraz ze zwiększaniem dawki nawozów (rys. 3). Całkowita wartość pobrania ¹⁵N z plonem nasion mieszanki wyniosła odpowiednio 0,30; 0,46; 0,54 i 0,64 g ¹⁵N/wazon, co stanowiło 75, 58, 45 i 40% zastosowanej dawki saletry amonowej.

Wykorzystanie azotu ¹⁵N z nawozów mineralnych przez jęczmień, przy zróżnicowanym udziale tej rośliny w mieszankach z grochem, kształtowało się na porównywalnym poziomie i wyniosło średnio 54%. Wartość współczynnika wykorzystania azotu przez komponent bobowaty zmniejszała się stosownie do liczby roślin grochu w wazonie i wyniosła 46–47,5%.

Podsumowanie

Ze względu na wykorzystanie azotu z nawozów mineralnych w największym stopniu, a tym samym najmniejsze ryzyko rozpraszania tego pierwiastka do środowiska przyrodniczego, optymalny udział jęczmienia w mieszance z grochem siewnym wyniósł 33%. Przy takim udziale komponentu zbożowego współczynnik wykorzystania azotu ¹⁵N przez biomasę całej mieszanki osiągnął 100%, przy czym 76% całkowitej dawki azotu z nawozów pobrane zostało z plonem nasion. Badania nad udziałem komponentów w mieszance nie dają jednoznacznych wyników i wskazują polepszenie jednych cech plonu, a pogorszenie innych zależnie od proporcji wysiewu^{26, 27}. Najczęściej spotykany w literaturze jest równy udział składnika zbożowego i strączkowego lub udział z przewagą komponentu rośliny bobowatej²⁸. Opisane wyniki badań własnych miały na celu oszacowanie, w jakim stopniu azot z nawozów zastosowanych pod mieszanki wykorzystywany jest przez komponenty mieszanek i wskazanie obsady, która jest optymalna ze względu na ograniczenie strat azotu z nawozów. Należy przy tym pamiętać, że rośliny bobowate pozostawiają w glebie znaczne ilości azotu, który również może podlegać potencjalnym stratom^{10, 29}. Wyniki badań, jakkol-

wiek nie miały na celu określenia wpływu obsady roślin na plonowanie ani na cechy jakościowe plonu, potwierdzają, że udział rośliny zbożowej w mieszance nieprzekraczający 50% stwarza najmniejsze ryzyko strat tego biogenu do wód.

Otrzymano: 22-03-2024

LITERATURA:

- [1] H. Hauggaard-Nielsen, P. Ambus, E.S. Jensen, *Field Crops Res.* 2001, **70**, 101.
- [2] M.B. Peoples, J. Brockwell, D.F. Herridge, I.J. Rochester, B.J.R. Alves, S. Urquiaga, R.M. Boddey, F.D. Dakora, S. Bhattaraj, S.L. Maskey, C. Sampet, B. Rerskasem, D.F. Khan, H. Hauggaard-Nielsen, E.S. Jensen, *Symbiosis* 2009, **48**, nr 1, 1.
- [3] V.O. Sadras, L. Lake, K. Chenu, L.S. McMurray, A. Leonforte, *Crop Pasture Sci.* 2012, **63**, nr 1, 33.
- [4] A. Ratnadass, P. Fernandes, J. Avelino, R. Habib, *Agron. Sustain. Dev.* 2012, **32**, 273.
- [5] A. Javanmard, A.D.M. Nasab, A. Javanshir, M. Moghaddam, H. Janmohammadi, *J. Food Agric. Environ.* 2009, **7**, 163.
- [6] E. Malezieux, Y. Crozat, C. Dupraz, M. Laurans, D. Makowski, H. Ozier-Lafontane, B. Rapidel, S. de Tourdonnet, M. Valantin-Morison, *Agron. Sustain. Dev.* 2009, **29**, 43.
- [7] E.S. Jensen, G. Carlsson, G. Hauggaard-Nielsen, *Agron. Sustain. Dev.* 2020, **40**, 5.
- [8] I.K. Thomsen et al., *Soil Use Manag.* 2001, **17**, 209.
- [9] H. Hauggaard-Nielsen, S. Mundus, E.S. Jensen, *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* 2003, **84**, 281.
- [10] J. Mayer, F. Buegger, E.S. Jensen, M. Schloter, *Plant Soil* 2003, **255**, nr 2, 541.
- [11] E.S. Jensen, *Fert. Res.* 1986, **10**, 193.
- [12] J.G. Waterer, J.K. Vessey, *Physiol. Plant.* 1993, **88**, 460.
- [13] A.M. Abdel Wahab, H.H. Zahran, M.H. Abd-Alla, *Folia Microbiol.* 1996, **41**, 303.
- [14] M.I. Bollman, J.K. Vessey, *Can. J. Bot.* 2006, **84**, 893.
- [15] R. Hood, G. Blair (red.), *Use of isotope and radiation methods in soil and water management and crop nutrition*, International Atomic Energy Agency, Vienna 2001.
- [16] A. Rutkowska, *J. Plant Nutr.* 2009, **32**, 1306.
- [17] T. Gylfadóttir, A. Helgadóttir, H. Høgh-Jensen, *Plant Soil* 2007, **297**, 93.
- [18] H.I. Erkovan, Y. Serin, *Asian J. Chem.* 2008, **20**, nr 3, 2205.
- [19] C. Naudin, G. Corre-Hellou, S. Pineau, Y. Crozat, M.H. Jeuffroy, *Field Crops Res.* 2010, **119**, 2.
- [20] E.S. Jensen, *Soil Biol. Biochem.* 1996, **28**, 159.
- [21] X. He, C. Critchley, C. Bledsoe, *Crit. Rev. Plant Serv.* 2003, **22**, 531.
- [22] S. Simard, M.D. Jones, D.M. Durall, [w:] *Mycorrhizal Ecology* (red. M.G.A. Heijden, I.R. Sanders), Springer, 2003.
- [23] C.M. Sanetra, O. Ito, S.M. Virmani, P.L.G. Vlek, *J. Exp. Botany* 1998, **49**, 853.
- [24] C. Salon, N.G. Munier-Jolain, G. Duc, A.S. Voisin, D. Grangirard, A. Larmure, R.J.N. Emery, B. Ney, *Agronomie* 2001, **21**, 539.
- [25] S. Schiltz, N. Munier-Jolain, Ch. Jeudy, J. Burstin, Ch. Salon, *Plant Physiol.* 2005, **137**, 1463.
- [26] A. Kotecki, M. Kozak, W. Malarz, *Zesz. Prob. Postęp. Nauk Rol.* 2003, **495**, 129.
- [27] J. Książak, M. Staniak, *J. Res. Appl. Agric. Eng.* 2009, **54**, nr 3, 157.
- [28] A.S. Lithourgidis, D.N. Vlachostergios, C.A. Dordas, C.A. Damalas, *Eur. J. Agronomy* 2011, **34**, 287.
- [29] H. Hauggaard-Nielsen, P. Ambus, E.S. Jensen, *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* 2003, **65**, 289.