

Efektywność rolnicza i fizjologiczna nawożenia azotem kukurydzy (*Zea mays* L.) uprawianej na ziarno

Agricultural and physiological efficiency of nitrogen fertilization of corn (*Zea mays* L.) grown for grain

Marek Niewęgłowski¹, Anna Sikorska², Marek Gugala¹, Ewa Krasnodębska³,
Krystyna Zarzecka¹

¹ Wydział Nauk Rolniczych, Uniwersytet w Siedlcach, ul. Prusa 14, 08-110 Siedlce, Polska, e-mail: marek.nieweglowski@uws.edu.pl, marek.gugala@uws.edu.pl, krystyna.zarzecka@uws.edu.pl

² Zakład Rolnictwa, Państwowa Akademia Nauk Stosowanych im. Ignacego Mościckiego w Ciechanowie, Ciechanów, ul. Narutowicza 9, 06-400 Ciechanów, Polska; e-mail: anna.sikorska@pansim.edu.pl

³ Gospodarstwo Rodzinne w Niemirkach 54, 08-304 Jabłonna Lacka, Polska

Słowa kluczowe: efektywność rolnicza, efektywność fizjologiczna, nawożenie azotem, *Zea mays* L., biostymulatory

Keywords: agricultural efficiency, physiological efficiency, nitrogen fertilization, *Zea mays* L., biostimulants

Streszczenie

Celem przeprowadzonych badań było określenie efektywności rolniczej i fizjologicznej nawożenia azotem kukurydzy (*Zea mays* L.) uprawianej na ziarno. Eksperyment polowy przeprowadzono w latach 2015–2017 w indywidulowanym gospodarstwie rolnym położonym w północno-wschodniej Polsce. Czynnikiem badawczym były dwa morfotypy kukurydzy: odmiana mieszańcowa średniopóźna (280 FAO); odmiana mieszańcowa średniowczesna (240 FAO); czynnik II – dawki nawożenia azotem: 80 kg N·ha⁻¹; 120 kg N·ha⁻¹; 160 kg N·ha⁻¹; czynnik III – cztery rodzaje biostymulatorów: obiekt kontrolny (I); biostymulator (II) zawierający orto-nitrofenol sodu, para-nitrofenol sodu i 5-nitroguajakol sodu; biostymulator (III) zawierający para-nitrofenolan potasu, orto-nitrofenolan potasu i 5-nitrowajakolan potasu; biostymulator (IV) zawierający molibden i cynk. Efektywność rolnicza i fizjologiczna nawożenia kukurydzy różnymi dawkami azotu w badanym doświadczeniu była istotnie największa dla dawki 80 kg N·ha⁻¹, natomiast wraz ze wzrostem dawki azotu efektywność malała. Czynnik genetyczny wpływał na efektywność rolniczą i fizjologiczną azotu. Z porównywanych odmian większą efektywnością rolniczą wyróżniał się mieszańiec średniowczesny w porównaniu do mieszańca średnio-późnego, odwrotną tendencję wykazano w przypadku wartości efektywności fizjologicznej. Zastosowane w doświadczeniu preparaty wpływały na zwiększenie efektywności rolniczej oraz mniejszą efektywność fizjologiczną wykorzystania azotu.

Abstract

The aim of the research was to determine the agricultural and physiological effectiveness of nitrogen fertilization of maize (*Zea mays* L.) grown for grain. The field experiment was conducted in 2015–2017 on an individual farm located in north-eastern Poland. The following factors were examined in the experiment: I – two corn varieties: medium-late hybrid variety 280 FAO – PR38N86; medium-early hybrid variety 240 FAO – P8400; II – doses of nitrogen fertilization: 80 kg N·ha⁻¹, 120 kg N·ha⁻¹, 160 kg N·ha⁻¹; III – four types of biostimulators: control treatment (I) biostimulator (II) containing sodium ortho-nitrophenol, sodium para-nitrophenol, 5-nitroguaiacol sodium, biostimulator containing potassium para-nitrophenolate, potassium ortho-nitrophenolate, potassium 5-nitrovacollate, biostimulator containing molybdenum, zinc. The agricultural and physiological effectiveness of corn fertilization with various doses of nitrogen in the tested experiment was significantly the highest for 80 kg N·ha⁻¹, while the effectiveness decreased with the increase in the nitrogen dose. The genetic factor influenced the agricultural and physiological efficiency of nitrogen. Of the compared varieties, the medium-early hybrid had higher agricultural efficiency than the mid-late hybrid, and the opposite tendency was demonstrated in the case of physiological efficiency values. The preparations used in the experiment increased agricultural efficiency and lower physiological efficiency of nitrogen use.

Wstęp

Azot jest podstawowym składnikiem odżywczym i ma decydujące znaczenie w intensyfikacji produkcji roślinnej. Obecne działania zmierzające do zwiększenia światowej produkcji zbóż, w tym produkcji kukurydzy, muszą skupić się na bardziej efektywnym wykorzystaniu azotu znajdującego się w nawozach mineralnych. Wzrost plonu na jednostkę użytego azotu jest szczególnie ważny ze względu na obawy o negatywny wpływ nadmiernego zużycia azotu na środowisko naturalne [1–3]. Kluczowym czynnikiem w tym aspekcie może być rosnąca zdolność roślin do pobierania tego pierwiastka [4] oraz stosowanie [5] azotu zawartego w każdej dawce nawozu mineralnego. Dlatego wyznaczanie optymalnych biologicznie i jednocześnie ekonomicznie dawek azotu, z uwzględnieniem czynników wpływających na pobieranie i stosowanie tego nawozu mineralnego, stanowi kierunek badań nad rolą azotu w kształtowaniu produkcji roślinnej. Filipek-Mazur i in. [6] również stwierdzili, że nawożenie azotem i określenie jego dawki jest jednym z najważniejszych czynników w uprawie kukurydzy. Także Camara i in. [7] i Lepiarczyk i in. [8] wykazali w swoich badaniach, że nawożenie azotem jest jednym z podstawowych elementów agrotechniki, które kształtują plon ziarna kukurydzy.

Według badań Kruczka [9] oraz Jankowiaka i in. [10] optymalne dawki azotu dla plonu ziarna kukurydzy mieszczą się w przedziale od 90 do 150 kg N·ha⁻¹. Również Gonet i Stadejek [11] oraz Fotyma [12] potwierdzają, że optymalne dawki

azotu zastosowane w uprawie kukurydzy oscylują w zakresie 90–180 kg N·ha⁻¹. Fotyma [12] i Kruczek [13] wskazują także, że efektywność nawożenia maleje wraz ze wzrostem dawek azotu.

Badania Szulca i in. [14] wykazały, że efektywność wykorzystania azotu zależy od odmiany kukurydzy. Odmiany typu stay-green cechował ujemny wskaźnik efektywności wykorzystania azotu. Również Gołębiewska i Wróbel [15] wskazali w swoich badaniach wpływ czynnika genetycznego na efektywność wykorzystania azotu. Autorzy stwierdzili, że o wiele łatwiej można zaplanować dawkę azotu dla odmiany Boruta, gdyż działanie azotu w zależności od wysokości dawki w przypadku tej odmiany było bardziej stabilne, niż miało to miejsce w odniesieniu do odmiany Junak.

Do ważniejszych elementów agrotechniki kukurydzy ograniczających plonowanie kukurydzy, czego konsekwencją jest ujawnianie się w jej tkankach niedoboru składników mineralnych, zalicza się nawożenie, które najsilniej wpływa na plonowanie i skład chemiczny roślin, a ponadto jest warunkiem otrzymania plonów dobrej jakości. Jednym ze sposobów zwiększania dostępności składników mineralnych jest nawożenie rzędowe zlokalizowane w bezpośredniej bliskości korzeni, zwane startowym, stosowane łącznie z siewem nasion [16].

Według Maidla [17] do połowy czerwca kukurydza wytwarza tylko 25% końcowej masy korzeniowej, z czego ponad 90% mieści się w pobliżu rzędka siewnego. Toteż roślina zdecydowanie łatwiej pobiera nawóz wysiany rzędowo, zwłaszcza w niekorzystnych warunkach termicznych. Ponadto taki sposób aplikacji fosforu powoduje umieszczenie składnika pokarmowego w głębszej, wilgotniejszej warstwie gleby, co wpływa na lepsze jego pobieranie.

Według Kruczka [13] optymalna dawka azotu, wyznaczona na podstawie relacji plonu suchej masy i nawożenia azotem, wynosi 150 kg i pozwala na osiągnięcie plonu maksymalnie 14,5 t·ha⁻¹. Ten sam autor [18] w innych badaniach podaje, że plony ziarna kukurydzy nawożonej dawkami od 60 do 135 kg N·ha⁻¹ nie różniły się, ale były większe niż uzyskane przy nawożeniu dawką 25 kg N·ha⁻¹. Istotne różnice we wzroście plonów kukurydzy przy jednoczesnym zwiększeniu dawki nawożenia azotem od 120 do 160 kg·ha⁻¹ wykazali w swoich badaniach Machul i Księżak [19] oraz Natywa i in. [20]. Bogucka i in. [21] zwracają uwagę na znaczące zróżnicowanie reakcji kukurydzy na nawożenie azotem w zależności od jej odmiany i podają, że dla odmiany Junak wystarczające okazało się nawożenie azotem w dawce 150 kg·ha⁻¹, a mieszaniec Boruta reagował wzrostem plonu ziarna do dawki 180 kg·ha⁻¹. Również Gołębiewska i Wróbel [15] stwierdziły znaczące zróżnicowanie reakcji poszczególnych odmian kukurydzy na nawożenie azotem.

Celem przeprowadzonych badań było określenie efektywności rolniczej i fizjologicznej nawożenia azotem kukurydzy (*Zea mays* L.) uprawianej na ziarno.

Materiały i metody

Miejsce przeprowadzenia doświadczenia

Eksperyment polowy przeprowadzono w latach 2015–2017 w indywidulnym gospodarstwie rolnym położonym w północno-wschodniej Polsce (52°30'N i 22°26'E). Czynniki w doświadczeniu były:

I – dwa morfotypy kukurydzy:

- odmiana mieszańcowa średniopóźna 280 FAO – PR38N86,
- odmiana mieszańcowa średniowczesna 240 FAO – P8400.

II – dawki nawożenia azotem zastosowane przed siewem:

- dawka azotu – 80 kg N·ha⁻¹,
- dawka azotu – 120 kg N·ha⁻¹,
- dawka azotu – 160 kg N·ha⁻¹.

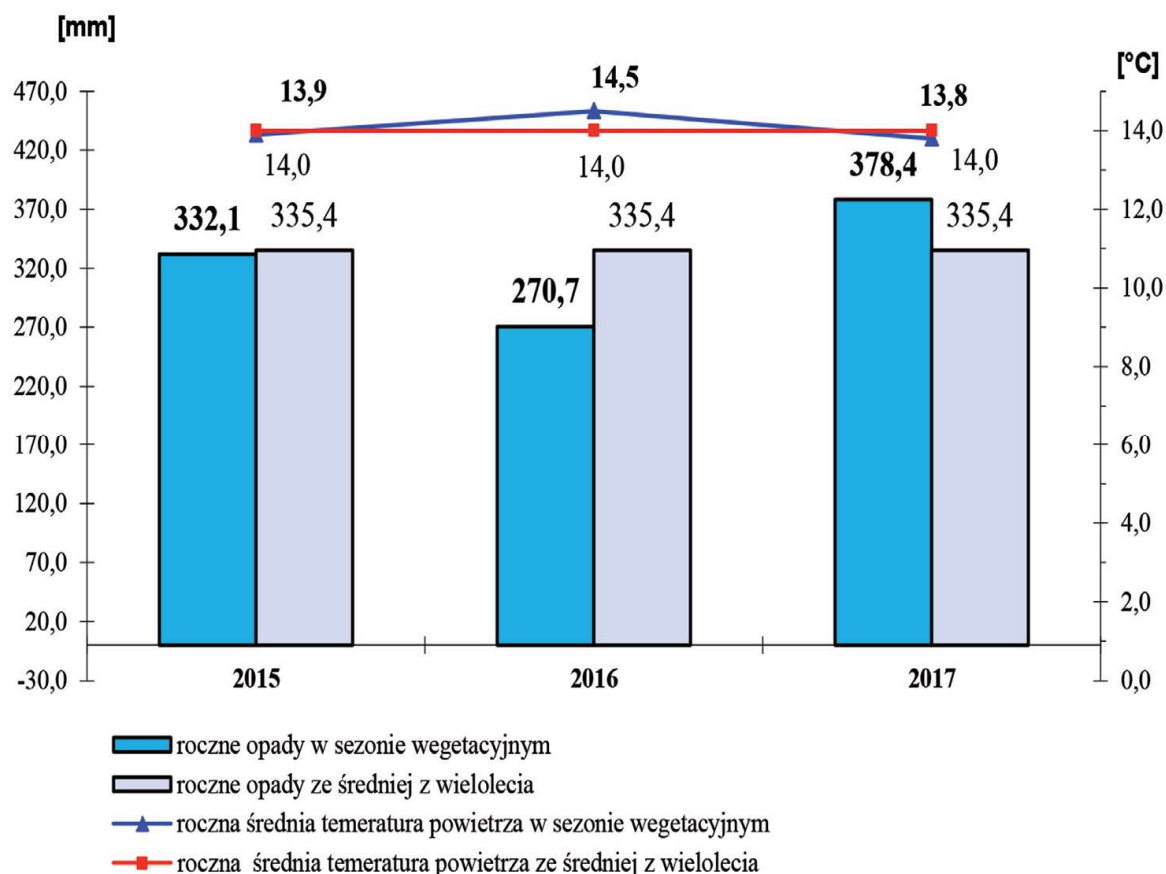
III – cztery rodzaje biostymulatorów:

- obiekt kontrolny (I),
- biostymulator (II) zawierający orto-nitrofenol sodu, para-nitrofenol sodu i 5-nitroguajakol sodu aplikowany w fazie BBCH 14 oraz BBCH 18 w dawkach 0,60 dm³·ha⁻¹,
- biostymulator (III) zawierający para-nitrofenolan potasu, orto-nitrofenolan potasu i 5-nitrowajakolan potasu zastosowany w fazie BBCH 14 w dawce 1,00 dm³·ha⁻¹ oraz w fazie BBCH 18 w dawce 0,60 dm³·ha⁻¹,
- biostymulator (IV) zawierający molibden i cynk aplikowany w fazie BBCH 16 w dawce 2,00 dm³·ha⁻¹.

Warunki meteorologiczne

Lata badań polowych były dość zróżnicowane pod względem średniej temperatury powietrza i sumy opadów (Rysunki 1–4). Na podstawie obliczonego współczynnika hydrotermicznego Sielanianowa według Skowery [22] można stwierdzić, iż pierwszy sezon wegetacyjny charakteryzował się optymalnymi warunkami atmosferycznymi ($K = 1,41$) (Tabela 1). Średnia temperatura powietrza była niższa o 0,1°C od średniej z wielolecia, a suma opadów wynosiła 332,1 mm i była niższa o 1,0 % od średniej z wielolecia (Rysunek 2). Drugi rok badań wyróżniał się suchymi warunkami panującymi w okresie rozwoju i wzrostu kukurydzy ($K = 1,12$). W kwietniu stwierdzono dość suche warunki, maju – optymalne i październiku – skrajnie wilgotne, natomiast w czerwcu – suche, w lipcu i sierpniu – bardzo suche, zaś we wrześniu – skrajnie suche. Suma opadów była mniejsza o 64,7 mm w porównaniu ze średnią sumy opadów w tych miesiącach z wielu lat, a temperatura powietrza była wyższa o 0,5°C od średniej wieloletniej (Rysunek 3). Ostatni sezon wegetacyjny charakteryzował się umiarkowanie mokrymi warunkami atmosferycznymi ($K = 1,41$), jednakże wy-

stąpiły miesiące o warunkach skrajnych – od bardzo suchych w lipcu do dość suchych w czerwcu i sierpniu. W trzecim roku badań średnia temperatura powietrza była niższa o 0,2°C od średniej z wielolecia, a suma opadów wynosiła 378,4 mm i była wyższa o 43 mm od średniej z wielolecia (Rysunek 4).

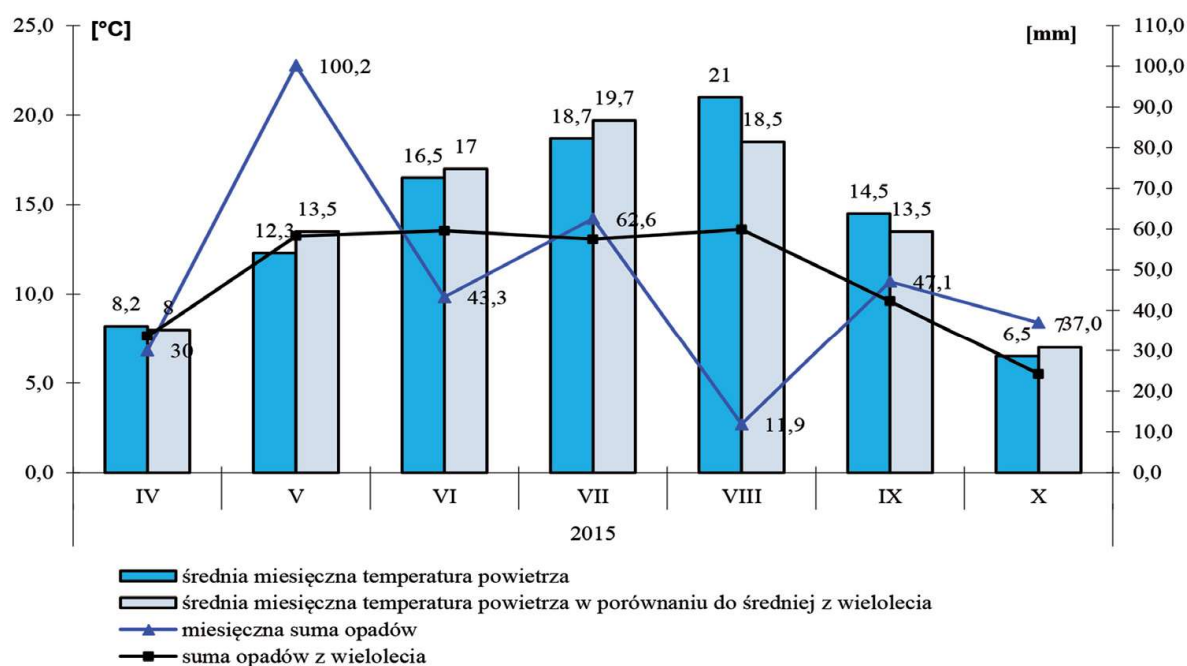


Wykres. 1. Miesięczne sumy opadów i średnia temperatura powietrza w poszczególnych sezonach wegetacyjnych RSD Zawady w porównaniu do średniej z wielu lat (1996–2010).

Figure 1. Monthly rainfall totals and average air temperature in individual growing seasons of AES Zawady compared to the average for many years (1996–2010).

Źródło: opracowano na podstawie danych meteorologicznych.

Source: prepared on the basis of meteorological data.

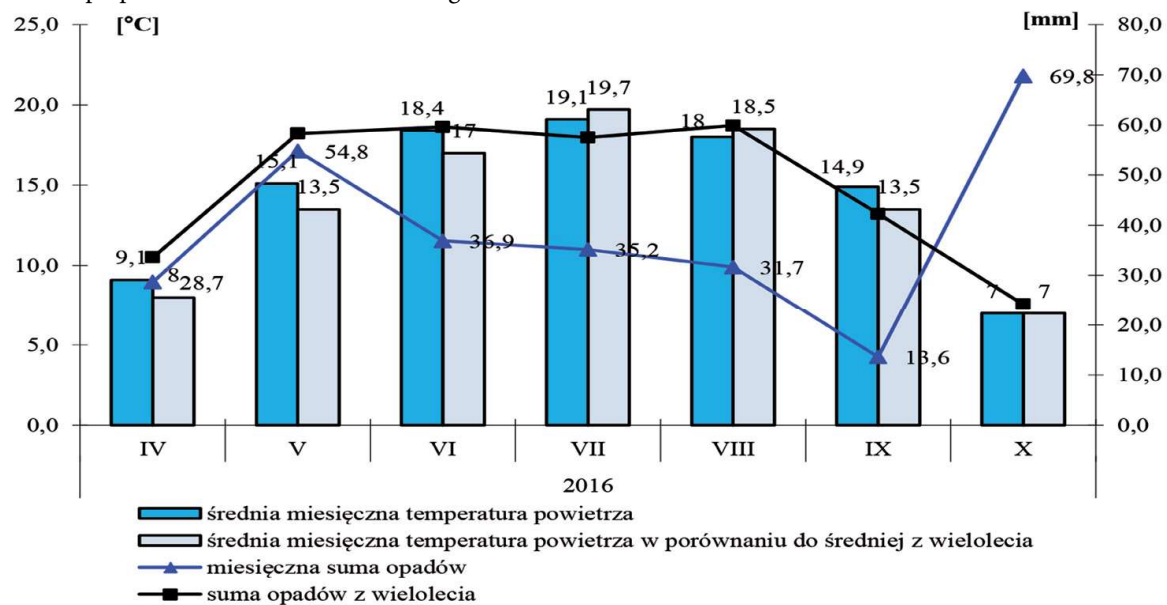


Wykres. 2. Miesięczne sumy opadów i średnia temperatura powietrza w 2015 r. w RSD Zawady w porównaniu do średniej z wielu lat (1996–2010).

Figure 2. Monthly rainfall totals and average air temperature in 2015 in the Zawady AES compared to the average for many years (1996–2010).

Źródło: opracowano na podstawie danych meteorologicznych.

Source: prepared on the basis of meteorological data.

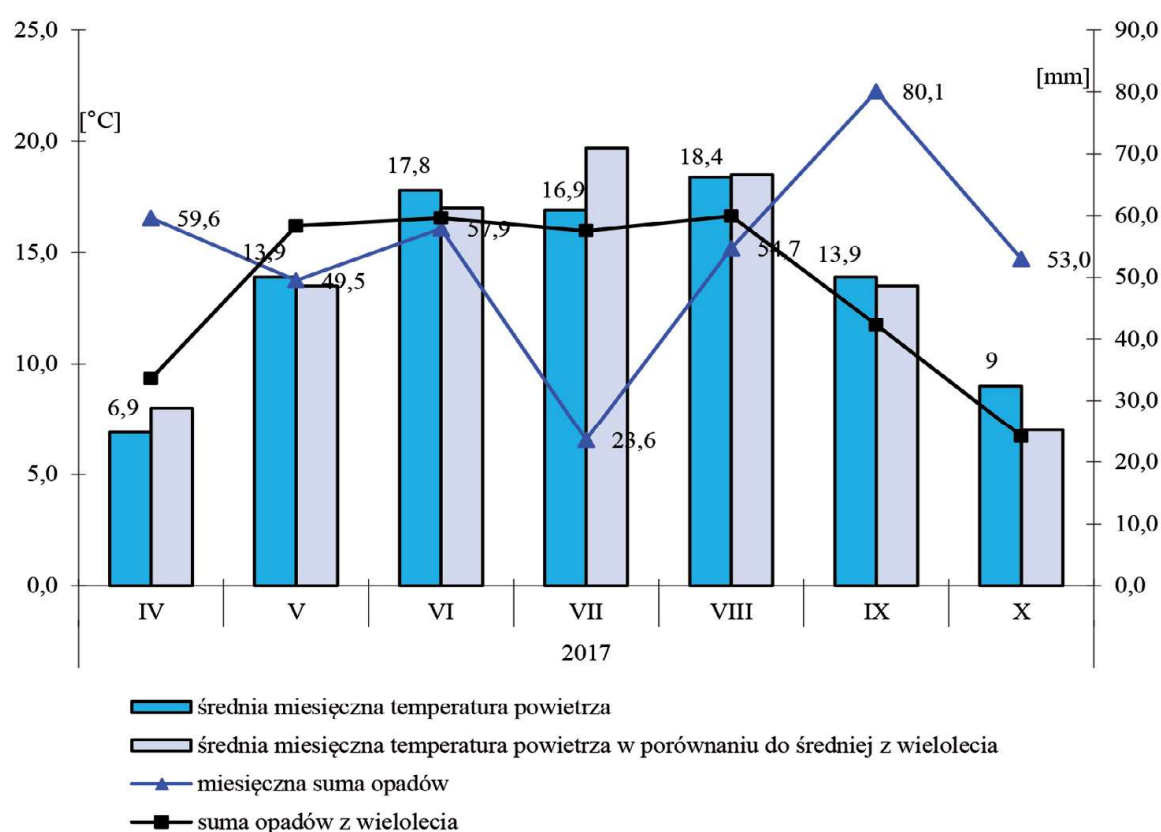


Wykres. 3. Miesięczne sumy opadów i średnie temperatury powietrza w RSD Zawady w porównaniu do średniej z wielu lat (1996–2010).

Figure 3. Monthly rainfall totals and average air temperature in 2016 in the Zawady AES compared to the average for many years (1996–2010).

Źródło: opracowano na podstawie danych meteorologicznych.

Source: prepared on the basis of meteorological data.



Wykres. 4. Miesięczne sumy opadów i średnie temperatury powietrza w 2017 r. w RSD Zawady w porównaniu do średniej z wielu lat (1996–2010).

Figure 4. Monthly rainfall totals and average air temperature in 2017 in the Zawady AES compared to the average for many years (1996–2010).

Źródło: opracowano na podstawie danych meteorologicznych.

Source: prepared on the basis of meteorological data.

Tabela 1. Wartość współczynnika Sielanianowa (Stacja Meteorologiczna Zawady, Poland).

Table 1. Sielanianov hydrothermal coefficient (Agricultural Experimental Station, Poland).

Sezon wegetacyjny	Miesiące							IV–X
	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	
Wartość współczynnika Sielanianowa*								Średnia
2015	1,35	2,91	0,84	1,21	0,20	1,20	2,15	1,41
2016	1,08	1,47	0,72	0,64	0,62	0,28	3,02	1,12
2017	3,82	1,52	1,07	0,47	1,01	1,92	2,36	1,74

* Wartość współczynnika (Skowera, [22]): skrajnie suchy (ss) $k \leq 0,4$; bardzo suchy (bs) $0,4 < k \leq 0,7$; suchy (s) $0,7 < k \leq 1,0$; dość suchy (ds) $1,0 < k \leq 1,3$; optymalny (o) $1,3 < k \leq 1,6$; dość wilgotny (dw) $1,6 < k \leq 2,0$; wilgotny (w) $2,0 < k \leq 2,5$; bardzo wilgotny (bw) $2,5 < k \leq 3,0$; skrajnie wilgotny (sw) $k > 3,0$

Źródło: opracowano na podstawie danych meteorologicznych.

Source: prepared on the basis of meteorological data.

Analiza statystyczna

Wyniki badań opracowano statystycznie za pomocą analizy wariancji. Istotność źródeł zmienności sprawdzano przy użyciu testu „F” Fishera-Snedecora, a ocenę istotności różnic przy poziomie istotności $p = 0,05$ pomiędzy porównywanymi średnimi – za pomocą wielokrotności przedziałów Tukeya.

Wskaźniki efektywności nawożenia

Wskaźniki efektywności nawożenia azotem obliczono według wzorów Potarzyckiego [23]:

$$W (\%) = (PN - PO) \times 100 / D$$

gdzie:

W – wykorzystanie azotu (%);

PN – azot pobrany przez rośliny nawożone ($\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$);

PO – azot pobrany przez rośliny nienawożone ($\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$);

D – dawka azotu ($\text{kg} \cdot \text{Nha}^{-1}$).

Efektywność rolniczą obliczono za pomocą następującego wzoru:

$$Er = (YN - Y0) / N$$

gdzie:

Er – efektywność rolnicza ($\text{kg s.m.} \cdot \text{kg}^{-1}\text{N}$);

YN – plon w obiekcie z zastosowaną dawką azotu ($\text{t} \cdot \text{ha}^{-1}$);

Y0 – plon w obiekcie kontrolnym bez azotu ($\text{t} \cdot \text{ha}^{-1}$).

Efektywność fizjologiczną obliczono za pomocą następującego wzoru:

$$Ef = (YN - Y0) / (PN - P0) \times 100$$

gdzie:

Ef – efektywność fizjologiczna ($\text{kg s.m.} \cdot \text{kg}^{-1}\text{N}$);

YN – plon w obiekcie z zastosowaną dawką azotu ($\text{t} \cdot \text{ha}^{-1}$);

Y0 – plon w obiekcie kontrolnym bez azotu ($\text{t} \cdot \text{ha}^{-1}$).

PN – azot pobrany przez rośliny nawożone ($\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$);

PO – azot pobrany przez rośliny nienawożone ($\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$).

Wyniki badań i dyskusja

Efektywność rolnicza nawożenia azotem kukurydzy

Miarą skuteczności nawożenia roślin azotem jest efektywność rolnicza wyrażona przyrostem plonu na 1 kg azotu zastosowanego w nawozach [24]. Badania własne wykazały, że w latach o większej ilości opadów atmosferycznych efektywność rolnicza u roślin nawożonych większymi dawkami azotu była mniejsza w porównaniu

z roślinami otrzymującymi niższe dawki. Natomiast w 2016 r., kiedy to było mało opadów, zwłaszcza w okresie od maja do września, efektywność rolnicza była znacznie mniejsza niż w latach poprzednich i większa w przedziale dawek 120–160 kg niż 80 kg N·ha⁻¹ (Tabele 2 i 3). Odmienne wyniki badań uzyskał Kruczek [25], który stwierdził ograniczanie efektywności rolniczej w miarę wzrostu dawek azotu.

Z porównywanych odmian efektywnością rolniczą większą średnio o 25,26 kg s.m.·kg⁻¹N wyróżniła się odmiana P8400 (mieszaniec średniowczesny), istotnie mniejszą – średnio o 22,35 kg s.m.·kg⁻¹N – mieszaniec średniopóźny PR38N86.

Stwierdzono interakcję czynnika genetycznego i lat badań. Odmiany różnie reagowały na warunki wilgotnościowo-termiczne w kolejnych latach badań. Odmiany PR38N86 i P8400 uzyskały w trzecim roku badań w porównaniu do pozostałych istotnie większą efektywność rolniczą. Obliczenia statystyczne wykazały, że w drugim roku badań efektywność rolnicza obu badanych odmian była mniejsza średnio o 17,67 kg s.m.·kg⁻¹N u odmiany PR38N86 i o średnio 10,74 kg s.m.·kg⁻¹N u P8400 w stosunku do efektywności tych odmian w trzecim roku badań.

Badania własne wykazały istotny wpływ badanych dawek azotu na efektywność rolniczą nawożenia azotem kukurydzy. Największą efektywność rolniczą w porównaniu z obiektem kontrolnym, wynoszącą średnio 26,57 kg s.m.·kg⁻¹N, uzyskano, stosując dawkę azotu 120 kg N·ha⁻¹, zaś najmniejszą, wynoszącą średnio 19,81 kg s.m.·kg⁻¹N, przy nawożeniu dawką 80 kg N·ha⁻¹. Natomiast według Borowieckiego [26] oraz Goneta i Stadejek [27] efektywność rolnicza nawożenia azotem kukurydzy była podobna i zarówno dla dawek 90–120 kg, jak i dla dawek 120–150 kg wynosiła 25–30 kg s.m.·kg⁻¹N.

Interakcja stwierdzona pomiędzy odmianami a dawkami azotu świadczy o zróżnicowanej reakcji odmian na nawożenie azotem. Zastosowane nawożenie azotem wpływało istotnie na zwiększenie efektywności rolniczej kukurydzy.

Biostymulator zawierający orto-nitrofenol sodu, para-nitrofenol sodu i 5-nitroguajakol sodu (obiekt II) oraz zastosowany na obiekcie 3 preparat zawierający para-nitrofenolan potasu, orto-nitrofenolan potasu i 5-nitrowajakolan potasu wpływały na zwiększenie efektywności rolniczej wykorzystania azotu przez kukurydzę od 0,16 do 2,18 kg s.m.·kg⁻¹N w porównaniu do obiektu kontrolnego. Najmniejszą wartość omawianej cechy – wynoszącą średnio 21,27 kg s.m.·kg⁻¹N – zanotowano na obiekcie IV, na którym zastosowano biostymulator zawierający molibden i cynk. Obliczenia statystyczne wykazały interakcję lat i nawożenia azotem, co świadczy o różnym działaniu dawek azotu w zmiennych warunkach pogodowych w latach badań. W pierwszym i drugim roku badań największy poziom efektywności rolniczej uzyskano pod wpływem zastosowania dawki 120 kg N·ha⁻¹, natomiast w trzecim roku badań największą wartość omawianej cechy otrzymano pod wpływem dawki 160 kg N·ha⁻¹.

Statystycznie udowodnione zostało współdziałanie lat i stosowanych biostymulatorów, co świadczy o odmiennym działaniu biostymulatorów w zmieniających się warunkach klimatycznych w czasie badań. Jedynie w pierwszym roku badań pod wpływem biostymulatora zastosowanego na obiekcie II i w drugim roku badań w wyniku aplikacji biostymulatora zawierającego orto-nitrofenol sodu, para-nitrofenol sodu i 5-nitroguajakol sodu (obiekt II) oraz biostymulatora zawierającego para-nitrofenolan potasu, orto-nitrofenolan potasu i 5-nitrowajakolan potasu (obiekt III) zanotowano zwiększenie efektywności rolniczej nawożenia azotem w stosunku do obiektu kontrolnego. Nie udowodniono istotnych różnic między biostymulatorami w drugim i trzecim roku badań.

Tabela 2. Efektywność rolnicza i fizjologiczna nawożenia azotem oraz wykorzystanie azotu przez kukurydzę w zależności od czynników badawczych oraz interakcji odmian z czynnikami badawczymi.

Table 2. Agricultural and physiological efficiency of nitrogen transport and nitrogen utilization in maize depending on factors and differences with research regulators.

Odmiany	Lata badań			Dawki nawożenia azotem			Rodzaje stosowanych biostymulatorów*				Średnia
	2015	2016	2017	80 kg N·ha ⁻¹	120 kg N·ha ⁻¹	160 kg N·ha ⁻¹	I	II	III	IV	
Efektywność rolnicza nawożenia azotem kukurydzy (kg s.m.·kg ⁻¹ N)											
PR38N86	18,77	15,31	32,98	17,46	26,30	23,31	22,25	24,38	22,10	20,69	22,35
P8400	26,11	19,47	30,21	22,17	26,85	26,78	25,50	27,73	25,98	21,84	25,26
Średnia	22,44	17,39	31,60	19,81	26,57	25,04	23,88	26,06	24,04	21,27	–
NIR _{0,05} dla: lat – 1,79; odmian – 1,17; dawek azotu – 1,53; rodzajów stosowanych biostymulatorów – 2,01 interakcji: lata × odmiany – 2,03 odmiany × dawki azotu – 1,78 odmiany × rodzaje stosowanych biostymulatorów – r.n.											
Efektywność fizjologiczna nawożenia azotem kukurydzy (kg s.m.·kg ⁻¹ N)											
PR38N86	49,13	44,05	76,26	68,68	53,29	47,48	59,15	56,56	55,73	54,49	56,48
P8400	31,24	44,54	76,37	55,54	49,81	46,79	50,78	52,27	51,56	48,26	50,72
Średnia	40,19	44,30	76,31	62,11	51,55	47,13	54,96	54,42	53,65	51,37	
NIR _{0,05} dla: lat – 2,96; odmian – 1,93; dawek azotu – 1,83; rodzajów stosowanych biostymulatorów – 2,82 interakcji: odmiany × lata – 3,34 odmiany × dawki azotu – 2,14 odmiany × rodzaje stosowanych biostymulatorów – r.n.											

Ciąg dalszy tabeli nr 2

Wykorzystanie azotu przez kukurydzę (%)											
PR38N86	35,01	30,77	36,38	30,67	41,77	29,71	30,78	37,85	33,95	33,63	34,05
P8400	71,28	28,88	34,59	48,95	46,57	39,23	45,12	50,25	44,48	39,82	44,92
Średnia	53,14	29,82	35,49	39,81	44,17	34,47	37,95	44,05	39,22	36,72	–

NIR_{0,05} dla: lat – 2,53; odmian – 1,65; dawek azotu – 2,27; rodzajów stosowanych biostymulatorów – 2,84
 interakcji: lata × odmiany – 2,86
 odmiany × dawki azotu – 2,65
 odmiany × rodzaje stosowanych biostymulatorów – 4,13

* I – obiekt kontrolny

II – biostymulator zawierający orto-nitrofenol sodu, para-nitrofenol sodu i 5-nitroguajakol sodu

III – biostymulator zawierający para-nitrofenolan potasu, orto-nitrofenolan potasu i 5-nitrowajakolan potasu

IV – biostymulator zawierający molibden i cynk

Źródło: opracowano na podstawie danych meteorologicznych.

Source: prepared on the basis of meteorological data.

Tabela 3. Efektywność rolnicza i fizjologiczna nawożenia azotem oraz wykorzystanie azotu przez kukurydzę w zależności od czynników badawczych oraz interakcji lat badań z czynnikami badawczymi.

Table 3. Agricultural and physiological efficiency of nitrogen transport and nitrogen utilization in maize depending on factors and results of studies with research scientists.

Lata badań	Dawki nawożenia azotem			Rodzaje stosowanych biostymulatorów*				Średnia
	80 kg N·ha ⁻¹	120 kg N·ha ⁻¹	160 kg N·ha ⁻¹	I	II	III	IV	
Efektywność rolnicza nawożenia azotem kukurydzy (kg s.m.·kg-1 N)								
2015	21,67	25,39	20,27	22,47	28,92	22,27	16,10	22,44
2016	13,17	20,27	34,06	16,76	17,51	18,96	16,33	19,58
2017	24,59	34,06	36,14	32,40	31,74	30,89	31,36	31,60
Średnia	19,81	26,57	30,15	23,88	26,06	24,04	21,27	–
NIR _{0,05} dla: lat – 1,79; dawek azotu – 1,53; rodzajów stosowanych biostymulatorów – 2,01 interakcji: lata × dawki azotu – 2,64 lata × rodzaje stosowanych biostymulatorów – 3,17								
Efektywność fizjologiczna nawożenia azotem kukurydzy (kg s.m.·kg ⁻¹ N)								
2015	50,86	37,10	32,60	46,03	41,86	40,44	32,41	40,19
2016	56,41	41,01	35,47	44,97	43,61	44,94	43,68	44,30
2017	79,06	76,55	73,33	73,89	77,79	75,56	78,02	76,31
Średnia	62,11	51,55	47,13	54,96	54,42	53,65	51,37	–
NIR _{0,05} dla: lat – 2,96 dawek azotu – 1,83; rodzajów stosowanych biostymulatorów – 2,82 interakcji: lata × dawki azotu – 3,17 lata × rodzaje stosowanych biostymulatorów – 4,45								

Ciąg dalszy tabeli nr 3

Wykorzystanie azotu przez kukurydzę (%)								
2015	59,90	59,52	40,00	47,37	66,49	51,83	46,87	53,14
2016	20,79	36,08	32,60	29,08	30,68	30,88	28,65	29,82
2017	38,74	36,91	30,81	37,40	34,98	34,94	34,64	35,49
Średnia	39,81	44,17	34,47	37,95	44,05	39,22	36,72	–
NIR _{0,05} dla: lat – 2,53; dawek azotu – 2,27; rodzajów stosowanych biostymulatorów – 2,84; interakcji: lata × dawki azotu – 3,94 lata × rodzaje stosowanych biostymulatorów – 4,49								

*I – obiekt kontrolny

II – biostymulator zawierający orto-nitrofenol sodu, para-nitrofenol sodu i 5-nitroguajakol sodu

III – biostymulator zawierający para-nitrofenolan potasu, orto-nitrofenolan potasu i 5-nitrowajakolan potasu

IV – biostymulator zawierający molibden i cynk

Źródło: opracowano na podstawie danych meteorologicznych.

Source: prepared on the basis of meteorological data.

Efektywność fizjologiczna nawożenia azotem kukurydzy

Efektywność fizjologiczna jest to przyrost plonu na jednostkę azotu pobranego przez rośliny z nawozów. Jest miarą zdolności roślin do przetworzenia pobranego azotu na plon użytkowy i świadczy o wydajności procesów gospodarowania tym pierwiastkiem.

Największą efektywność fizjologiczną nawożenia azotem kukurydzy na ziarno – wynoszącą średnio 76,31 kg s.m.·kg⁻¹N – zanotowano w trzecim roku badań, w którym średnia roczna temperatura powietrza była niższa o 0,2°C od średniej rocznej temperatury z wielolecia, istotnie mniejszą – wynoszącą średnio 44,30 kg s.m.·kg⁻¹N – w drugim roku badań, zaś najmniejszą – średnio 40,19 kg s.m.·kg⁻¹N – w pierwszym roku badań, w którym roczna średnia temperatura była niższa od średniej rocznej temperatury z wielolecia o 0,1°C. (Tabela 3).

Obliczenia statystyczne wykazały istotny wpływ odmian na efektywność fizjologiczną. Wartość tej cechy różniła się istotnie dla obu odmian i wynosiła średnio 56,48 kg s.m.·kg⁻¹N dla PR38N86 oraz dla P8400 – średnio 50,72 kg s.m.·kg⁻¹N.

Badania własne wykazały, że największą efektywność fizjologiczną wykorzystania azotu uzyskano po zastosowaniu 80 kg N·ha⁻¹. Wartość tej cechy przy najwyższym wariacie nawożenia była mniejsza średnio o 14,98 kg s.m.·kg⁻¹N w porównaniu do obiektu, w którym zastosowano najniższą dawkę azotu.

Stwierdzona interakcja pomiędzy odmianami a dawkami azotu świadczy o zróżnicowanej reakcji odmian na nawożenie azotem. Zastosowane nawożenie azotem wpływało istotnie na zwiększenie poziomu efektywności fizjologicznej wykorzystania azotu przez kukurydzę, niezależnie od porównywanych dawek azotu.

Analiza wariancji wykazała istotny wpływ rodzajów stosowanych biostymulatorów na wartość omawianej cechy. Po zastosowaniu wszystkich biostymulatorów przy odmianie PR38N86 otrzymano mniejszą efektywność fizjologiczną wykorzystania azotu w porównaniu do obiektu kontrolnego. Najmniejszą wartość omawianej cechy – wynoszącą średnio $51,37 \text{ kg s.m.} \cdot \text{kg}^{-1}\text{N}$ – stwierdzono na obiekcie IV, który był opryskiwany biostymulatorem zawierającym molibden oraz cynk. Natomiast u odmiany średniowczesnej jedynie pod wpływem biostymulatora zastosowanego na obiekcie IV nastąpiło obniżenie poziomu efektywności fizjologicznej nawożenia azotem.

Nie stwierdzono interakcji między odmianami kukurydzy a rodzajami stosowanych biostymulatorów, co wskazuje, że biostymulatory oddziaływały podobnie na efektywność fizjologiczną wykorzystania azotu kukurydzy różnych odmian.

Udowodniono interakcję lat badań z nawożeniem azotem. We wszystkich okresach badań największą wartość omawianej cechy otrzymano przy dawce $80 \text{ kg N} \cdot \text{ha}^{-1}$, przy czym we wszystkich obiektach największą wartość omawianej cechy uzyskano w trzecim roku badań.

Obliczenia statystyczne wykazały interakcję rodzajów stosowanych biostymulatorów wzrostu i warunków atmosferycznych panujących w latach badań. W pierwszym i drugim roku badań stwierdzono zmniejszenie efektywności fizjologicznej nawożenia azotem pod wpływem biostymulatorów w porównaniu do obiektu kontrolnego. Statystycznie istotne różnice w wartości tej cechy stwierdzono jedynie między preparatami zawierającymi orto-nitrofenol sodu, para-nitrofenol sodu, 5-nitroguajakol sodu (obiekt II) oraz tymi zawierającymi molibden i cynk (obiekt IV) oraz na obiektach III i IV w pierwszym roku badań. W trzecim roku badań nie udowodniono istotnych różnic między obiektami, w przypadku których zastosowano biostymulatory, i obiektem kontrolnym, natomiast stwierdzono wzrost poziomu efektywności fizjologicznej nawożenia azotem kukurydzy uprawianej na ziarno.

Oddziaływanie biostymulatorów na efektywność fizjologiczną nawożenia azotem kukurydzy determinowały zastosowane dawki azotu. Przy dawce azotu $80 \text{ kg N} \cdot \text{ha}^{-1}$ zawartość azotu uzyskana pod wpływem biostymulatorów różniła się od zawartości azotu odnotowanej na obiekcie kontrolnym jedynie o $5,26 \text{ kg s.m.} \cdot \text{kg}^{-1}\text{N}$ po zastosowaniu biostymulatora zawierającego orto-nitrofenol sodu, para-nitrofenol sodu i 5-nitroguajakol sodu. Nie udowodniono istotnych różnic między biostymulatorami. Przy dawce azotu $120 \text{ kg N} \cdot \text{ha}^{-1}$ i $160 \text{ kg N} \cdot \text{ha}^{-1}$ następował spadek efektywności fizjologicznej wykorzystania azotu; wykazano istotną różnicę między wartością badanej cechy uzyskanej pod wpływem biostymulatorów a jej wartością dla obiektu kontrolnego przy środkowej dawce azotu oraz między jej wartością dla obiektu kontrolnego a jej wartością uzyskaną pod wpływem biostymulatora aplikowanego na obiekcie IV przy największej dawce azotu.

Wykorzystanie azotu przez kukurydzę

Największą efektywność wykorzystania azotu (średnio 53,14%) otrzymano w pierwszym roku badań, cechującym się średnimi temperaturami powietrza oraz sumami opadów najbardziej zbliżonymi do średnich z wielolecia, zaś najmniejszy (średnio 29,82%) w drugim roku badań, w którym suma opadów była mniejsza o 64,70 mm od średniej z wielolecia 1996–2000, a średnia temperatura powietrza była wyższa o 0,5°C od średniej z tego wielolecia (Tabele 2 i 3).

Obliczenia statystyczne wykazały, że większą efektywnością wykorzystania azotu – wynoszącą średnio 44,92% – charakteryzowała się odmiana średniowczesna P8400, zaś mniejszym – wynoszącą średnio 34,05% – mieszańcem średniopóźny PR38N86.

Dawki azotu determinowały poziom wykorzystania azotu przez kukurydzę. Przy dawce azotu wynoszącej 80 kg N·ha⁻¹ otrzymano mniejszą średnio o 4,36% wartość omawianej cechy niż przy dawce azotu 120 kg N·ha⁻¹. W przeprowadzonym doświadczeniu pod wpływem stosowanych dawek azotu zanotowano wykorzystanie azotu na poziomie 34,47–44,17%. Natomiast Kruczek [25] w swoich badaniach stwierdził, że wykorzystanie azotu z nawozów przez kukurydzę uprawianą na ziarno wahało się w zakresie badanych dawek (0–270 kg N·ha⁻¹) w granicach 29,0–71,0%. Ten sam autor również w innych swoich badaniach [9] stwierdził spadek wykorzystania azotu wraz ze wzrostem dawki azotu z 45 do 180 kg N·ha⁻¹ i od 23 do 54,8% w odniesieniu do plonu ziarna. Szulc i in. [28] stwierdzili, że wykorzystanie azotu w warunkach polowych wynosi najczęściej 40–60%, co potwierdzają eksperymenty polowe.

Udowodniono interakcję pomiędzy odmianami i dawkami azotu, co oznacza zróżnicowaną reakcję odmian na dawki azotu. Odmiana średniowczesna największą wartość omawianej cechy uzyskała po zastosowaniu 80 kg N·ha⁻¹, natomiast odmiana średniopóźna przy 120 kg N·ha⁻¹.

Stosowane biostymulatory wpływały istotnie na poziom wykorzystania azotu przez kukurydzę, co ukazało porównanie obiektów, w których wykorzystano biostymulatory, do obiektu kontrolnego, w którym ich nie użyto. Największą wartość omawianej cechy zanotowano na obiekcie II (średnio – 9,84 t·ha⁻¹), istotnie mniejszą na poletkach opryskiwanymi preparatami na obiekcie III (średnio – 9,44 t·ha⁻¹) i IV (średnio – 9,15 t·ha⁻¹).

Obliczenia statystyczne wykazały interakcję lat i dawek azotu, co świadczy o różnym działaniu dawek azotu w zmiennych warunkach pogodowych w latach badań. We wszystkich sezonach wegetacyjnych zanotowano zwiększenie zawartości azotu ogólnego w ziarnie kukurydzy pod wpływem stosowanych dawek azotu w porównaniu do obiektu kontrolnego. W pierwszym roku badań najwyższy poziom azotu ogólnego otrzymano pod wpływem zastosowania dawki 120 kg N·ha⁻¹, nie udo-

wodniono natomiast istotnych różnic wartości tej cechy pomiędzy dawkami 120 kg N·ha⁻¹ i 160 kg N·ha⁻¹. W drugim i trzecim roku badań efektem zastosowania dawek azotu było istotne podniesienie zawartości azotu ogólnego w ziarnie kukurydzy.

Stwierdzono wpływ biostymulatorów i warunków klimatycznych panujących w latach badań na wykorzystanie azotu przez kukurydzę. W pierwszym i ostatnim sezonie wegetacyjnym największą zawartość azotu ogólnego zanotowano w efekcie zastosowania biostymulatora na obiekcie II. Jedynie w pierwszym roku dostrzeżono istotne różnice pomiędzy działaniem stosowanych biostymulatorów, natomiast nie stwierdzono istotnych różnic pomiędzy obiektem kontrolnym a obiektami III i IV, w których zastosowano biostymulatory.

Wnioski

1. Efektywność rolnicza i fizjologiczna nawożenia kukurydzy różnymi dawkami azotu w badanym doświadczeniu była istotnie największa dla dawki azotu 80 kg N·ha⁻¹, natomiast wraz ze wzrostem dawki azotu malała.
2. Ponadto stwierdzono wpływ czynnika genetycznego na efektywność rolniczą i fizjologiczną azotu. Spośród porównywanych odmian większą efektywnością rolniczą cechował się mieszaniec średniowczesny w porównaniu do mieszańca średniopóźnego, odwrotną tendencję wykazano w przypadku wartości efektywności fizjologicznej.
3. Efektami zastosowania w doświadczeniu preparatów było zwiększenie efektywności rolniczej oraz obniżenie efektywności fizjologicznej wykorzystania azotu.

Literatura

- [1] Cassman K.G., Dobermann A., Walters D.T., Yang H., Meeting cereal demand while protecting natural resources and improving environmental quality, *Annual Review of Environment and Resources*, 2003, 28, s. 315–358.
- [2] Chen X.P., Zhou J.C., Wang X.R., Blackmer A.M., Zhang F.S., Optimal rates of nitrogen fertilization for a winter wheat-corn cropping system in Northern China, *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2004, 35, s. 583–597.
- [3] Rahimizadeh M., Kashani A., Zare-Feizabadi A., Koocheki A.R., Nassiri-Mahallati M., Nitrogen use efficiency of wheat as affected by preceding crop, application rate of nitrogen and crop residues, *Australian Journal of Crop Science*, 2010, 4, s. 363–368.
- [4] Peng Y., Niu J., Peng Z., Zhang F., Li Ch., Shoot growth potential drives N uptake in maize plants and correlates with root growth in the soil, *Field Crops Research*, 2010, 115, s. 85–93.
- [5] Niu J.F., Chen F.J., Mi G.H., Li C.J., Zhang F.S., Transpiration, and nitrogen uptake and flow in two maize (*Zea mays* L.) inbred lines as affected by nitrogen supply, *Annals of Botany*, 2007, 99, s. 153–160.

- [6] Filipek-Mazur B., Lepiarczyk A., Tabak M., Wpływ nawożenia azotem i siarką na plonowanie oraz skład chemiczny ziarna kukurydzy. Część II. Zawartość azotu i siarki, *Fragmenta Agronomica*, 2013, 30(4), s. 29–35.
- [7] Camara K.M., Payne W.A., Rasmussen P.E., Long term effects of tillage, nitrogen and rain fall on winter wheat yields in the Pacific Northwest, *Agronomy Journal*, 2003, 95, s. 828–835.
- [8] Lepiarczyk A., Filipek-Mazur B., Tabal M., Wpływ nawożenia azotem i siarką na plonowanie i skład chemiczny ziarna kukurydzy. Część I. Wielkość i komponenty plonu ziarna kukurydzy, *Fragmenta Agronomica*, 2013, 30(3), s. 115–122.
- [9] Kruczek A., Określenie optymalnych dawek, sposobów i terminów stosowania nawozów azotowych pod kukurydzę uprawianą na ziarno, *Materiały Konferencji Naukowej pn. „Stan badań nad agrotechniką kukurydzy w Polsce”*, IUNG Puławy, 1988, cz. II, s. 19–24.
- [10] Jankowiak J., Kruczek A., Fotyma E., Efekty nawożenia mineralnego kukurydzy na podstawie wyników badań krajowych, *Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych*, 1997, 450, s. 79–116.
- [11] Gonet Z., Stadejek H., Wpływ nawożenia azotem na plon i wartość paszową kukurydzy uprawianej w dużym zagęszczeniu na zielonkę do bezpośredniego skarmiania, *Pamiętnik Puławski*, 1992, 101, s. 137–146.
- [12] Fotyma E., Reakcja roślin uprawy polowej na nawożenie azotem. Cz. III. Kukurydza, *Fragmenta Agronomica*, 1994, 4(44), s. 20–35.
- [13] Kruczek A., Zmienność i korelacja elementów struktury plonu kukurydzy (*Zea mays* L.) w zależności od warunków pogodowych i nawożenia azotem, *Roczniki Akademii Rolniczej w Poznaniu, Rolnictwo*, 1997, 50, s. 49–54.
- [14] Szulc P., Bocianowski J., Waśkiewicz A., Beszterda M., Impact of applying different nitrogen fertilizers on the level of fumonisins in maize hybrids, *Progress in Plant Protection*, 2012, 52(2), s. 306–309.
- [15] Gołębiowska M., Wróbel E., The effect of nitrogen fertilization on yielding of maize, *Biuletyn Instytutu Hodowli i Aklimatyzacji Roślin*, 2009, 251, s. 121–136.
- [16] Kruczek A., Szulc P., Tempo gromadzenia suchej masy przez kukurydzę w zależności od dawki fosforu, rodzaju nawozu i sposobu nawożenia, *Acta Agrophysica*, 2005, 6(3), s. 631–642.
- [17] Maidl F.X., Standortgerechte Stickstoffversorgung, *Mais*, 1997, 1, s. 6–7.
- [18] Kruczek A., Szulc P., Wpływ wielkości dawek fosforu, rodzaju nawozu i sposobu nawożenia na plonowanie kukurydzy uprawianej na ziarno, *Pamiętnik Puławski*, 2005, 140, s. 149–150.
- [19] Machul M., Księżak J., Ocena plonowania kukurydzy w zależności od sposobu przygotowania roli i metody określenia dawki nawożenia azotem w warunkach monokultury i zmianowania, *Fragmenta Agronomica*, 2007, 3(95), s. 292–299.
- [20] Nattywa M., Pocijowska M., Majchrzak L., Pudielko K., Influence of irrigation and nitrogen fertilization on yield and leaf greenness index (SPAD) of maize, *Acta Scientiarum Polonorum, Agricultura*, 2014, 13(1), s. 39–50.

- [21] Bogucka B., Szemplinski W., Wróbel E., Nawożenie azotem a plon kukurydzy uprawianej na ziarno w warunkach północno-wschodniej Polski, *Acta Scientiarum Polonorum, Agricultura*, 2008, 7(3), s. 21–30.
- [22] Skowera B., Zmiany warunków hydrotermicznych na obszarze Polski (1971–2010). *Fragmenta Agronomica*, 2014, 31(2), s. 74–87.
- [23] Potarzycki J., Improving nitrogen use efficiency of maize by better fertilizing practices, *Nawozy i Nawożenie*, 2010, 39, s. 5–24.
- [24] Fotyma E., Wpływ nawożenia siarką na wykorzystanie azotu z nawozów mineralnych przez rośliny uprawy polowej, *Nawozy i Nawożenie*, 2003, 4(17), s. 117–136.
- [25] Kruczek A., Efektywność nawożenia azotem kukurydzy uprawianej na ziarno w rejonie Wielkopolski, *Roczniki Nauk Rolniczych, A*, 1996, 112(3–4), s. 50–66.
- [26] Borowiecki J., Efektywność nawożenia azotem kukurydzy kiszonkowej w zależności od obsady roślin, *Materiały Konferencji Naukowej pn. „Stan badań nad agrotechniką kukurydzy w Polsce”*, IUNG Puławy 1988, s. 10–15.
- [27] Gonet Z., Stadejek H., Wpływ nawożenia azotem i ilości wysiewu na plony kukurydzy uprawianej na zielonkę bezpośrednio do skarmiania, *Fragmenta Agronomica*, 1990, 3, s. 30–43.
- [28] Szulc P., Response of maize hybrid (*Zea mays* L.), stay-green type to fertilization with nitrogen, sulphur, and magnesium. Part I. Yields and chemical composition, *Acta Scientiarum Polonorum, Agricultura*, 2010, 9(1), s. 29–40.