



Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu
Wydział Rolnictwa i Bioinżynierii

mgr inż. Adam Podolski

**Reakcja kukurydzy na wzrastające dawki azotu w dwóch
systemach nawożenia siarką na tle naturalnych warunków
opadowych i deszczowania**

Response of maize to increasing doses of nitrogen in two sulfur
fertilization systems against the background
of natural rainfall and irrigation conditions

Rozprawa doktorska w dziedzinie nauk rolniczych

w dyscyplinie Rolnictwo i Ogrodnictwo

Doctoral thesis in Agricultural sciences

in the discipline Agriculture and Horticulture

Promotor:

Profesor dr hab. Witold Grzebisz

Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu

Poznań, 2024

1.	Wstęp.....	7
1.1.	Problematyka badawcza.....	7
1.2.	Hipoteza badawcza i cele pracy	8
1.3.	Przegląd literatury	9
1.3.1.	Kukurydza — pochodzenie – znaczenie gospodarcze.....	9
1.3.2.	Potrzeby siedliskowe kukurydzy	10
1.3.3.	Potrzeby pokarmowe kukurydzy	13
1.3.4.	Areał uprawy i plony kukurydzy w Polsce.....	17
1.3.5.	Czynniki środowiskowe prowadzące do powstania luki plonu w Polsce.....	19
1.3.6.	Siarka – potrzeby pokarmowe – źródła nawozowe	22
1.3.7.	Wapń w roślinie — źródła nawozowe wapnia.....	27
1.3.8.	Reakcja kukurydzy na azot	29
2.	Materiały i metodyka.....	35
2.1.	Lokalizacja doświadczenia i warunki glebowe.....	35
2.2.	Warunki agrochemiczne.....	35
2.3.	Schemat doświadczenia	38
2.4.	Zabiegi agrotechniczne	38
2.5.	Charakterystyka odmiany kukurydzy	40
3.	Pomiary i oznaczenia.....	41
3.1.	Pobór próbek glebowych i roślinnych oraz obserwacje polowe.....	41
3.2.	Oznaczenia laboratoryjne gleby	42
3.3.	Oznaczenia laboratoryjne materiału roślinnego.....	43
3.4.	Metodyka oznaczania P, C i S w materiale roślinnym.....	44
3.5.	Kryteria oceny stanu odżywienia kukurydzy	44
3.6.	Wskaźniki bilansowe i efektywności azotu	44
3.7.	Obliczenia statystyczne	45
4.	Wyniki badań.....	46
4.1.	Plon i struktura plonu ziarna	46
4.1a.	Doświadczenie nienawadniane	46
4.1b.	Doświadczenie nawadniane.....	52
4.2.	Biomasa kukurydzy w sezonie wegetacyjnym	57
4.2a.	Doświadczenie nienawadniane	57
4.2b.	Doświadczenie nawadniane.....	61
4.3.	Zawartość składników pokarmowych w stadium BBCH 15	65

4.3a. Doświadczenie nienawadniane	65
4.3b. Doświadczenie nawadniane.....	70
4.4. Liść podkolbowy – zawartość składników pokarmowych – stan odżywienia.....	74
4.4a. Doświadczenie nienawadniane	74
4.4b. Doświadczenie nawadniane.....	79
4.5. Skład chemiczny pędu kukurydzy	86
4.5a. Doświadczenie nienawadniane	86
4.5b. Doświadczenie nawadniane.....	90
4.6. Ziarno	94
4.6a. Doświadczenie nienawadniane	94
4.6b. Doświadczenie nawadniane.....	99
4.7. Zawartość składników pokarmowych w słomie	104
4.7a. Doświadczenie nienawadniane	104
4.7b. Doświadczenie nawadniane	108
4.8. Azot mineralny w glebie – stadium BBCH 14.....	111
4.8a. Doświadczenie nienawadniane	111
4.8b. Doświadczenie nawadniane.....	117
4.9. Azot mineralny w glebie – stadium BBCH 61.....	122
4.9a. Doświadczenie nienawadniane	122
4.9b. Doświadczenie nawadniane.....	128
4.10. Azot mineralny w glebie – stadium BBCH 89.....	133
4.10a. Doświadczenie nienawadniane	133
4.10b. Doświadczenie nawadniane.....	138
4.11. Akumulacja azotu przez kukurydzę w sezonie wegetacyjnym.....	142
4.11a. Doświadczenie nienawadniane	142
4.11b. Doświadczenie nawadniane.....	150
4.12. Wskaźniki gospodarki kukurydzy azotem	157
4.12a. Doświadczenie nienawadniane	157
4.12a.1. Przed kwitnieniem, BBCH 14 – BBCH 61	157
4.12a.2. Po kwitnieniu – nalewanie ziarna	161
4.12b. Doświadczenie nawadniane.....	166
4.12b.1. Przed kwitnieniem, BBCH 14 – BBCH 61.....	166
4.12b.2. Po kwitnieniu – nalewanie ziarna	168
5. Omówienie i dyskusja wyników	172
5.1. Plon	172

5.1.1. Plon ziarna	172
5.1.2. Struktura plonu ziarna	177
5.1.3. Ziarno – zawartość składników pokarmowych	179
5.2. Ocena stanu odżywienia kukurydzy w krytycznych stadiach	182
formowania plonu	182
5.2.1. Stadium 4-tego liścia	182
5.2.2. Liść podkolbowy	185
5.2.3. Pęd	188
5.2.4. SPAD jako wskaźnik diagnostyczny plonu.....	190
5.3. Bilans azotu w okresie wegetacji kukurydzy	193
5.3.1. Zasoby azotu w stadium BBCH 14	193
5.3.2. Zasoby N w okresie wzrostu wegetatywnego	197
5.3.3. Faza nalewania ziarna.....	202
6. Podsumowanie i wnioski	206
6.1. Podsumowanie	206
6.2. Wnioski	209
7. Literatura.....	211
8. Spis tabel i rycin.	227
8.1. Tabele.....	227
8.2. Ryciny	229
8.3. Ryciny załączniki.	234
8.4. Załączniki	238
8.5. Zdjęcia.....	242
9. Ryciny załączniki.....	243
10. Załączniki.....	271

Streszczenie

Koncepcja rozprawy doktorskiej opiera się na założeniu, że wprowadzenie siarki do technologii produkcji kukurydzy istotnie zwiększa produktywność azotu (N) w układzie gleba/roślina, a tym samym plon ziarna. Hipoteza badawcza brzmi: „system nawożenia siarką w istotny sposób wpływa na gospodarkę N w okresie przed i po kwitnieniu kukurydzy”. Tym samym wpływa na kształtowanie się składników struktury plonu ziarna, a co za tym idzie na plon.

Weryfikację hipotezy przeprowadzono w dwóch niezależnych eksperymentach, różniących się jedynie warunkami wodnymi: (I) naturalnym – zasilanym deszczem i (II) naturalnym + nawadnianym. Czynniki doświadczenia: (1) trzy systemy nawożenia siarką (68 kg S ha⁻¹): a. NPK, ur. NPK-S0 (siarka elementarna), ok. NPK-CaS (siarczan wapnia); (2) sześć dawek N: 0, 40, 80, 120, 160 i 200 kg N·ha⁻¹. Pomiary biometryczne i chemiczne (rośliny i gleby) przeprowadzono w trzech fazach wzrostu kukurydzy: BBCH 14; BBCH 61; BBCH 89.

Maksymalne plony ziarna kukurydzy nienawadnianej osiągnęły poziom 8,0 na NPK; 8,1 na NPK-S0; 8,0 t ha⁻¹ na NPK-CaS dla dawek N wynoszących 136, 200 i 126 kg N ha⁻¹. W przypadku nawadnianej kukurydzy wartości te wynosiły 10,5; 10,0 i 10,1 dla 154; Odpowiednio 123 i 119 kg N ha⁻¹. Przewidywanie plonu na podstawie zawartości składników pokarmowych w części rośliny wskaźnikowej było najbardziej wiarygodne (najwyższa wartość R²) okazała się dla pędu w BBCH 61. Plon na obiekcie nienawadnianym ograniczał mangan (faktycznie potas), a na nawadnianym N i miedź . Fazy przed kwitnieniem od BBCH 14 do BBCH 61 były krytyczne dla formowania struktury plonu. W tym okresie odnotowano istotny spadek masy N_{min} w glebie, większy na obiekcie nawadnianym. Uwalnianie netto N_{min} z gleby było zarówno większe dla kukurydzy nawadnianej, jak i wykazywało wzrost w odpowiedzi na system nawożenia siarką (+32% i 45%, odpowiednio dla NPK-S0 i NPK-CaS). Większy plon ziarna kukurydzy nawadnianej, której struktura plonu ukształtowała się przed kwitnieniem, wynikał ze wzrostu gęstości ziarna na jednostkę powierzchni, a w mniejszym stopniu ze wzrostu masy 1000 ziaren. Plon ziarna kukurydzy nawadnianej, którego struktura ukształtowała się po kwitnieniu, zależał istotnie od masy 1000 ziarniaków.

Słowa kluczowe: Plon ziarna; składniki plonu; zawartość składników pokarmowych; azot mineralny; bilans azotowy plantacji przed i po kwitnieniu.

Summary

The concept of the doctoral thesis is based on the assumption that the introduction of sulfur (S) into maize production technology significantly increases the productivity of nitrogen (N) in the soil/plant system, and thus the grain yield. The research hypothesis sounds: „the sulfur fertilization system significantly affects N management in the pre- and post-flowering period of maize growth”. Thus, it affects the formation of grain yield structure components and, consequently, the yield.

Validation of the hypothesis was carried out in two independent experiments, differing only in water conditions: (I) natural – rainfed and (II) natural + irrigated conditions. Experimental factors: (1) three S fertilization systems (68 kg S ha⁻¹): a. NPK, b. NPK-S0 (elemental sulfur), c. NPK-CaS (calcium sulfate); (2) six N rates: 0, 40, 80, 120, 160 and 200 kg N ha⁻¹. The biometric and chemical measurements (plant and soil) were carried out in three stages of maize growth: BBCH 14; BBCH 61; BBCH 89.

Maximum grain yields for non-irrigated maize reached 8.0 on NPK; 8.1 on NPK-S0; 8.0 t ha⁻¹ on NPK-CaS for N rates of 136, 200 and 126 kg N ha⁻¹. For irrigated maize, the values were as 10.5; 10.0 and 10.1 for 154; 123 and 119 kg N ha⁻¹, respectively. Yield prediction based on the nutrient content in the indicative plant's part was the most reliable (highest R²) proved to be for the shoot at BBCH 61. The yield on the non-irrigated object was limited by manganese (actually) potassium and on the irrigated object were N and copper.

The pre-flowering phases from BBCH 14 to BBCH 61 were critical for the formation of the yield structure. During this period, a significant decrease in the mass of N_{min} in the soil was recorded, being clearly greater on the irrigated object. The net N_{min} release from the soil was both higher for irrigated maize and showed increase in response to the sulfur fertilization system (+32% and 45%, for NPK-S0 and NPK-CaS, respectively). The higher grain yields of irrigated maize, which yield structure was formed before flowering, resulted from an increase in grain density per unit area and to a lesser extent from an increase in the 1,000 kernels weight. Grain yield of rainfed maize, which structure was formed after flowering, depended significantly on the 1,000 kernels weight.

Key words: Grain yield, yield components, nutrient content, mineral nitrogen, pre- and postflowering nitrogen canopy balance.

1. Wstęp

1.1. Problematyka badawcza

Kukurydza zalicza się do grupy roślin uprawnych, które dominują w światowej produkcji ziarna. Postęp hodowlany w ciągu ostatnich 50 lat sprawił, że roślina, mająca swoje naturalne siedlisko w strefach klimatu ciepłego, uprawiana jest także w strefach klimatu umiarkowanego, chłodnego, w tym w Polsce. W okresie od 2010 do 2023 powierzchnia uprawy kukurydzy w Polsce zwiększyła się ponad 3,5-krotnie, lecz produkcja ziarna tylko 4-krotnie. Taka relacja między tymi dwoma składowymi wskazuje na ekstensywny model wzrostu produkcji. Plony ziarna w latach 2014-2023 wynosiły, średnio zaledwie $6,64 \pm 0,92$ t ha⁻¹. Luka plonu, będąca różnicą między plonami maksymalnymi, osiągalnymi w warunkach klimatycznych Polski, kształtowała się w tym okresie na poziomie $43 \pm 0,4\%$. Oznacza to, że statystyczny Polski rolnik wykorzystuje tylko 57% potencjału produkcyjnego uprawianych odmian. Przyczyn niskich plonów tej rośliny o dużej wrażliwości na warunki pogodowe jest wiele, lecz najważniejsza to uprawa w stanowiskach o niskiej, niedostatecznej żyzności gleby. Cecha to obejmuje dwie składowe. pierwszą jest odczyn, a drugą zasobność gleby w składniki pokarmowe. Kukurydzę, pomimo dużych wymagań wodnych i pokarmowych, uprawia się w stanowiskach zarówno kwaśnych, jak i ubogich w podstawowe składniki pokarmowe. Warunki wodne są dla tej rośliny kluczowym czynnikiem produkcyjnym. W okresie krytycznym, który rozciąga się od drugiej dekady lipca do trzeciej dekady sierpnia, niedobór wody wynosi około 150 mm. Już sama ta wartość wskazuje na konieczność nawadniania. O ile producent rolny ujmuje w planie nawozowym fosfor, potas, to niestety nie zwraca szczególnej uwagi na szereg innych składników pokarmowych, istotnych dla realizacji potencjału produkcyjnego kukurydzy. W tej grupie składników, które można określić jako drugoplanowe znajduje nie tylko magnez, lecz zwłaszcza siarka i wapń. Jak dotąd stan zasobności gleb uprawnych w siarkę i wapń w Polsce nie podlega urzędowemu monitoringowi przez Okręgowe Stacje Chemiczno-Rolnicze. Sporadycznie pojawiają się opracowania naukowe dotyczące bilansu siarki, lecz bez oceny zasobności gleby nie pozwalają na miarodajną ocenę wartości stanowiska pod kukurydzą. Gleby w Polsce ze względu na skałę macierzystą są naturalnie ubogie w wapń, a wysycenie glebowego kompleksu jest niedostateczne. W tym miejscu należy postawić podstawowe pytanie, *jak w produkcji kukurydzy w tak*

naturalnie słabych warunkach glebowych, a do tego niezrównoważonych agrochemicznie, kształtuje się efektywność produkcyjna stosowanego azotu?

1.2. Hipoteza badawcza i cele pracy

Podstawowe pytania, które w świetle przedstawionego powyżej stanu produkcji kukurydzy w Polsce, ściślej wskazanych przyczyn niskich plonów, brzmią:

- 1) Czy można zwiększyć efektywność azotu stosowanego w nawozach azotowych?
- 2) Czy wprowadzenie siarki do technologii produkcji kukurydzy zwiększy efektywność stosowanego azotu?
- 3) Czy forma chemiczna nośnika siarki jest istotna w systemie nawożenia kukurydzy siarką?
- 4) Czy jest możliwe połączenie w systemie nawożenia kukurydzy siarki i wapnia?
- 5) Czy kontrola warunków wodnych w trakcie wegetacji kukurydzy poprzez deszczowanie wpłynie na skuteczność działania siarki, ewentualnie siarki i wapnia?

Postawione powyżej pytania posłużyły do sformułowania hipotezy badawczej realizowanego projektu. Hipoteza badawcza pracy doktorskiej brzmi:

Efektywność plonotwórcza siarki stosowanej w produkcji kukurydzy na ziarno przejawia się w krytycznych okresach formowania plonu poprzez wpływ na zasoby dostępnego azotu w systemie gleba/roślina.

Na podstawie przedstawionej hipotezy badawczej sformułowano cele badawcze realizowanego projektu. Zakres celów przedstawia się następująco i sprowadza się do:

1. Określenia wpływu systemów nawożenia siarką na:
 - a. zasoby dostępnego azotu w krytycznych fazach formowania plonu ziarna,
 - b. stan odżywienia rośliny w krytycznych fazach formowania plonu ziarna,
 - c. stopień wykształcenia elementów struktury plonu ziarna,
 - d. plon ziarna.
1. Prognozy plonu ziarna na podstawie zawartości składników pokarmowych w całej roślinie w stadium BBCH 14 i BBCH 61, a także w liściu podkolbowym w stadium BBCH 61.
2. Określenia bilansu zasobów dostępnego azotu w okresie przed i po kwitnieniu kukurydzy.
3. Oceny diagnostycznej wartości wskaźników gospodarki azotem w okresie przed i po kwitnieniu kukurydzy.

1.3. Przegląd literatury

1.3.1. Kukurydza – pochodzenie – znaczenie gospodarcze

Kukurydza (*Zea mays* L.) została udomowiona około 7 500 do 10 000 lat na obszarze współczesnego Meksyku. W ciągu około 1000 lat rdzenni mieszkańcy tego regionu Ameryki uzyskali hybrydę powstałą ze spontanicznego skrzyżowania się dwóch dzikich traw, pierwszej z podgatunku *Zea diploperennis*, wywodzącej się od lokalnej trawy nazywanej *teonsite* i drugiej *Tripsacum*. Naturalna selekcja mieszańców polegała na sztucznym wybieraniu komponentów rodzicielskich związanych z cechami fenotypowymi (duże kolby i duża liczba rzędów w kolbie). Następnym etapem było wprowadzenia metod hodowlanych co pozwoliło uzyskać linie wsobne kukurydzy, które posiadały pożądane cechy produkcyjne i umożliwiły wykorzystanie zjawiska heterozji (Sobkowiak i in. 2013; Ranum i in., 2014).

Kukurydza jest gatunkiem jednorocznym należącym do rodziny *Poaceae* (wiechlinowate), podrodziny *Panicoideae* (prosoowate). Ogólnie można wydzielić pięć gatunków z rodzaju *Zea*: *Zea diploperennis*, *Zea perennis*, *Zea luxurians*, *Zea nicaraguensis* i *Zea Mays* L. Podział ten powstał na podstawie cech morfologicznych i rozmieszczenia geograficznego poszczególnych rodzajów *Zea* (Buckler i in., 2006). W uprawie powszechnie wykorzystywane jest sześć odmian botanicznych: *Zea mays* var. *tunicata* (kukurydza oplewiona); *Zea mays* var. *amylaceae* (kukurydza skrobiowa); *Zea mays* var. *saccharata* (kukurydza cukrowa); *Zea mays* var. *everta* (kukurydza pękająca); *Zea mays* var. *indurata* (kukurydza zwyczajna, ziarno typu flint); *Zea mays* var. *indentata* (kukurydza pastewna, ziarno typu dent) (Górny, 2005).

Kukurydza jest jedną z najbardziej wydajnych roślin zbożowych na świecie. W wolumenie produkcji ziarna nieznacznie wyprzedza pszenicę, a oba te zboża łącznie dostarczają prawie $\frac{2}{3}$ światowej produkcji. Natomiast w konsumpcji udział kukurydzy kształtuje się na poziomie około 12%, podczas gdy pszenica przekracza 44% (Nuss i Tanumihardjo, 2010). Kukurydza wykazuje bardzo intensywny trend światowej produkcji ziarna. W latach 2017-2019 w stosunku do 1993-1995 zwiększyła się o 118%, podczas, gdy uprawiana powierzchnia o 46%. Głównym czynnikiem wzrostu produkcji jest plon, który zwiększył się z 3,9 do 5,9 t ha⁻¹, czyli o 50% (Erenstaein i in., 2022). W 2023 roku całkowita produkcja kukurydzy wyniosła 1 215 mln t. Głównymi producentami kukurydzy w tym roku na świecie były USA, Chiny, których łączny udział stanowi ponad 54% światowej produkcji (FAOSTAT, 2023).

Kukurydza ma szerokie zastosowanie w gospodarce, lecz główne obszary wykorzystania to ziarno z przeznaczeniem na paszę dla inwentarza żywego, ziarno konsumpcyjne, produkcja bioetanolu i alkoholu, przemysł spożywczy i inny. Co się tyczy ziarna, to ile w USA i Europie dominuje przeznaczenie paszowe, czy też produkcja alkoholu i bioetanolu, tak w Afryce i na Bliskim Wschodzie zdecydowanie dominuje konsumpcja. Kukurydza kiszonkowa ma obecnie dwójakie znaczenie gospodarcze. Pierwszym i dominującym jest pasza dla bydła, a drugim, ciągle wzrastającym, jest produkcja biogazu (*Nuss i Tanumihardjo, 2010; Ranum i in., 2014*).

W Polsce uprawa kukurydzy ziarnowej wzrasta bardzo dynamicznie. W 2022 w stosunku do 2010 uprawiana powierzchnia zwiększyła się ponad 3,5-krotnie (1 196 vs. 333 tys. ha). W tym samym okresie produkcja ziarna zwiększyła się nieco ponad 4-krotnie (8 503 vs. 1994 tys. t). Jednakże plony ziarna wyniosły odpowiednio 5,98 i 7,11 t ha⁻¹, a średni plon w tym 12-leciu wyniósł zaledwie 6,642 t ha⁻¹ (przyrost +11%, *GUS, 2022*). Prognozowany wzrost plonu do 2030 w stosunku do 2010 jest ponad 2-krotnie większy, gdyż oszacowany jest na 26% (7,6 t ha⁻¹) (*Syp, 2015*). Można więc wysnuć wniosek, że o ile produkcja światowa ziarna kukurydzy zwiększa się w wyniku wzrostu plonów, tak w Polsce ma charakter ekstensywny, a środkiem do wzrostu jest wzrost powierzchni, kosztem innych upraw. Zatem w produkcji kukurydzy w Polsce w dalszym ciągu są duże rezerwy.

1.3.2. Potrzeby siedliskowe kukurydzy

Kukurydza jest rośliną dnia krótkiego o metabolizmie w typie C4 o dużych wymaganiach cieplnych, lecz jednocześnie jest bardzo wrażliwa na stesy termiczne (*Kurtyka i in., 2011; Wang i in., 2018*). Temperatura powietrza określa następowanie kolejnych faz rozwojowych, wyznaczając występowanie faz krytycznych w danym regionie geograficznym świata. W warunkach klimatycznych Polski ziarniak do skielkowania wymaga temperatury w zakresie 8-10°C. Przy takiej temperaturze gleby wschody następują szybko i są wyrównane. Spadek do 6°C powoduje opóźnienie kiełkowania, wschody wówczas są niepełne i nierówne. Duże straty w uprawie kukurydzy powodują przymrozki wiosenne. Spadek temperatury poniżej 0°C wpływa ujemnie na wzrost kukurydzy. Dochodzi do zamierania liści, a nawet do zahamowania wzrostu roślin. Optymalna temperatura od wschodów do kwitnienia kształtuje się na poziomie około 22°C. W okresie kwitnienia pożądana jest duża wilgotność powietrza i temperatura powyżej 23°C. Brak tych warunków prowadzi do obniżenia żywotności

pyłku. Skutkiem będą niezapylone kwiatki, co bezpośrednio przekłada się plon ziarna (Michalski, 2009; Król i in., 2018). Natomiast jesienią wystąpienie znacznych spadków temperatur wydłuża okres dojrzewania roślin. Przymrozki jesienne są bardzo niebezpieczne dla roślin, gdyż powodują wczesne usychanie liści, co prowadzi do zahamowania fotosyntezy i skutkuje zmniejszeniem jakości i wielkości plonów. Długotrwałe spadki temperatury poniżej 0 °C powodują pękanie ziarniaków, łamanie i porażenie łodyg przez choroby fuzaryjne (Scot, 2016).

Kukurydza jest rośliną uprawną o dużych wymaganiach wodnych. Wytwarza dużą biomasę przez co pobiera duże ilości wody z gleby. Jej współczynnik transpiracji wynosi 1:256, co wskazuje na oszczędną gospodarkę wodą (Sulewska, 2004). Może być to spowodowane pochodzeniem kukurydzy, która, jak już wcześniej podano, występuje naturalnie na obszarach, na których panuje klimat ciepły z okresowymi niedoborami wody. Plony ziarna kukurydzy istotnie zależą nie tyle od ilości wody, w tym zużytej do nawadniania, lecz głównie od ewapotranspiracji. Jak wykazał Djaman i in. (2013), współczynnik R^2 dla tej cechy osiągnął w badaniach nad nawadnianiem kukurydzy w zmiennych dawkach, aż 98%. Plony na w pełni nawadnianym obiekcie były zmienne w latach, lecz zawsze o kilka t ha⁻¹ większe, niż w warunkach naturalnego opadu.

Kukurydza jest rośliną obcopolną. Kwiaty męskie i żeńskie rozwijają się w odległości około metra od siebie, co czyni kukurydzę w odróżnieniu od klasycznych zbóż rośliną bardziej wrażliwą na warunki środowiska panujące w czasie kwitnienia, zwłaszcza na niedobór wody (Butler i Huybers, 2015). Kukurydza uprawiana jest w szerokich rzędach, dlatego oprócz współczynnika transpiracji istotny wpływ na gospodarkę wodną łanu ma ewaporacja. Proces ten polega na bezproduktywnym odparowaniu wody z powierzchni gleby nieprzykrytej roślinnością. Z tej też przyczyny kukurydza jest narażona na stres wodny w fazie kwitnienia (Kuś, 2016). Reakcja kukurydzy na niedobór wody, przykładowo spadek powierzchni liści, ujawnia się silnie już w stadium wyrzucania wiechy (BBCH 51) (Djaman i in., 2013).

Czynnikiem decydującym o uzyskaniu określonego plonu jest dostępność wody w okresie wegetacji. Kukurydza posiada bardzo rozbudowany system korzeniowy, który jest bardziej wydajny od systemu korzeniowego innych gatunków roślin zbożowych. Roślina ta jest w stanie pobierać wodę z głębszych warstw profilu glebowego. Ważną rolę w systemie korzeniowym odgrywają korzenie przybyszowe, które znajdują się płytko pod powierzchnią gleby co pozwala roślinom na pobieranie wody z bieżących opadów (Peng i in., 2010). Woda gruntowa znajdująca się na

głębokości metra stwarza najkorzystniejsze warunki dla kukurydzy (*Dubas, 2004*). W całym okresie wegetacji można wskazać dwie fazy rozwojowe kukurydzy, w których wymagania wodne są szczególnie duże. Deficyt wody w stadium BBCH 15-17 może prowadzić do niedorozwoju części generatywnych (*Gonzalez i in., 2019*). Niedobór wody w stadium wyrzucania wiechy będzie skutkował redukcją biomasy i spadkiem plonu ziarna (*Djaman i in., 2013*). Ponadto deficyt wody może spowodować opóźnienie kwitnienia znamion żeńskich na kolbach nawet o 10-12 dni. Skutkiem tego zjawiska będzie brak zapylnych ziarniaków w kolbie, co bezpośrednio przełoży się na plon ziarniaków w kolbie. Małe opady w tym okresie w połączeniu z wysoką temperaturą powietrza bezpośrednio oddziałują na warunki rozwoju roślin. Susza jest niebezpieczna dla uprawy kukurydzy w Polsce (*Szulc i in., 2020*).

Kukurydza jest w stanie eksplorować zasoby wodne aż do głębokości 150-180 cm (*Irmak i in., 2013*). Pierwsza reakcja rośliny na zmienne warunki wodne, ujawnia się już w stadium 7(8)-liścia i objawia się silnym zróżnicowaniem architektury systemu korzeniowego. W warunkach opadu naturalnego korzenie w wierzchniej warstwie gleby (do 30 cm) rosną horyzontalnie, a następnie dopiero wrastają pionowo na głębokość od 30 do 60 cm. W warunkach pełnego nawadniania, korzenie rosną głównie horyzontalnie. W warunkach incydentalnego nawadniania korzenie kukurydzy intensywnie eksplorują głębsze warstwy gleby. W okresie intensywnego wzrostu, system korzeniowy rozrasta się w profilu glebowym. Niedobór wody powoduje intensywną penetrację głębszych warstw gleby wraz z tworzeniem licznych korzeni bocznych. W takich warunkach środowiskowych korzenie sięgają nawet do ponad 120 cm w głąb gleby. W warunkach pełnego nawadniania korzenie rosną płytko, przerastając glebę najwyżej do 70-80 cm. W okresie dojrzewania architektura systemu korzeniowego kukurydzy jest odmienna, niż we wcześniejszych fazach a głębiej sięgają korzenie roślin intensywnie nawadnianych (*Jean i Weaver, 1924*).

Plon kukurydzy zależy od wczesności uprawianej odmiany. Odmiany wczesne mają mniejsze wymagania wodne. Problem z brakiem dostępu do wody częściej występuje w Polsce na glebach lekkich i średnich, szczególnie w latach suchych i ciepłych. Szacuje się, że zapotrzebowanie kukurydzy na wodę w całym okresie wegetacji w warunkach klimatycznych Polski mieści się w przedziale od 300 do 500 mm wody (*Kaczmarczyk, Nowak, 2006*). Okres krytyczny zapotrzebowania tej rośliny na wodę przypada na fazę kwitnienia i formowania kolby. Znaczny deficyt wody w tym okresie powoduje zaburzenie terminu wyrzucania wiechy, opóźnienie rozwoju

kwiatostanu. Prowadzi do redukcji produkcji i żywotności pyłku, a także zakłóca proces otwierania się słupków kwiatowych, co w konsekwencji skutkuje brakiem zapłodnienia, a także zamieraniem zarodków (*Butler i Huybers, 2015*).

Do uprawy kukurydza najlepsze są gleby żyzne, ciepłe, przepuszczalne, o głębokim profilu próchnicznym, pozwalającym zmagazynować duże ilości wody opadowej. W warunkach glebowych Polski kukurydzy nie powinno się uprawiać na glebach ciężkich, podmokłych i zimnych (*Książak, i in., 2015*). Stanowisko pod kukurydzą powinno posiadać odczyn zbliżony do obojętnego. Kukurydza jest rośliną tolerującą odczyn w zakresie 5,5-7,5. Uprawę na glebach bardziej kwaśnych ogranicza działanie toksycznego gliny, co bezpośrednio przekłada się na obniżkę plonu (*Dubas i in., 2004*). Uprawa kukurydzy na glebie o odczynie powyżej 6,5 narażona jest natomiast na zakłócenia w pobieraniu manganu i żelaza (*Fotyma, 2003*). Gleba zasobna w składniki pokarmowe pozwala roślinom na pełne wykorzystanie potencjału plonowania. Duża zasobność gleby w potas pozwoła kukurydzy na efektywną gospodarkę wodą i azotem. Na intensywność rozwoju systemu korzeniowego zwłaszcza we wczesnych fazach rozwojowych kukurydzy wpływa zasobność gleby w fosfor, która powinna kształtować się na wysokim poziomie (*Battisti i in., 2023*). Braki poszczególnych składników pokarmowych w glebie powinny być stale uzupełniane. Nawozy należy stosować na bieżąco przy jednoczesnym utrzymaniu dotychczasowego poziomu zasobności gleby. Składniki pokarmowe powinny być dostarczone w formach łatwo dostępnych dla kukurydzy (*Szmigiel i in., 2006*).

Kukurydza nie ma szczególnych wymagań względem przedplonu. Uprawa kukurydzy w monokulturze może prowadzić jednak do spadku plonów. Uproszczony płodozmian powoduje zwyżkę plony kształtującą się w przedziale 10-20%. Jednocześnie zapobiega jednostronnemu, nadmiernemu wyczerpaniu gleby w składniki pokarmowe (*Pikuła, 2014*).

1.3.3. Potrzeby pokarmowe kukurydzy

Czynniki środowiskowe i agrotechniczne, w tym nawożenie istotnie kształtują dynamikę pobierania i akumulacji składników pokarmowych przez kukurydzę. Potwierdzają to liczne badania, w tym najnowsze (*Singh i in., 2023*).

Kukurydza ze względu na znaczną produkcję biomasy, w tym masę organów generatywnych wykazuje duże zapotrzebowanie na składniki pokarmowe (*Heckman i in., 2003; Podleśna i in., 2017*). Według badań COBORU w warunkach Polski

kukurydza może wyprodukować około 65 t ha⁻¹ zielonej masy lub 12 t ha⁻¹ ziarna (COBORU, 2022). Dzienny przyrost biomasy kukurydzy może osiągnąć 245 kg ha⁻¹ dzień⁻¹. Podstawowym warunkiem tak dużego tempa wzrostu jest optymalne zaopatrzenie roślin w łanie w wodę i składniki pokarmowe. W okresie wegetacji dynamika pobierania składników pokarmowych jest zmienna. Niedobór składników pokarmowych w fazach krytycznych zawsze skutkuje obniżką plonu ziarna (Ciampitti i in., 2013).

a. azot – niedobór



b. azot – nadmiar



Fot. 1.1. Klasyczny niedobór i nadmiar azotu.

Niedobór azotu objawia się na dolnych liściach w kształcie litery V (a); nadmiar azotu skutkuje nadmiernym wzrostem części wegetatywnych; podwójna (potrójna) liczba kolb nie zawsze prowadzi do wzrostu plonu (b).
Źródło: udostępnienie Witold Grzebisz.

Pierwszy okres krytyczny rozwoju kukurydzy rozpoczyna się w stadium 5(6)-tego liścia. Od tego stadium roślina zwiększa intensywność pobierania składników pokarmowych, zwłaszcza azotu i potasu (Ciampitti i in., 2013). Kukurydza pobiera azot przez cały okres wegetacji. W początkowych fazach rozwojowych pobieranie tego składnika jest niewielkie, lecz niedobór może znacznie obniżyć potencjał plonowania, zwłaszcza w stadium BBCH 15(16), gdy dochodzi do inicjacji związków kwiatostanów (Gonzalez i in., 2019). Niedobór azotu będzie skutkował zmniejszeniem tempa wzrostu roślin (fot. 1.1a). Natomiast nadmiar azotu powoduje opóźnienie rozwoju generatywnego i wykształcenie więcej niż jednej kolby na roślinie (fot. 1.1b). Kukurydza po przekroczeniu stadium BBCH 16 aż do stadium BBCH 51 liniowo zwiększa akumulację azotu. Do fazy kwitnienia w łanie akumuluje około 75%

końcowej masy tego składnika (*Peng i in., 2010*). Niedobór azotu w tym okresie wegetacji powoduje zakłócenie formowania liści, kolb i elementów struktury plonu. Rośliny dobrze odżywione w okresie przed wyrzuceniem wiechy są jednocześnie bardziej odporne na niedobór wody i azotu w fazie kwitnienia (*Nasielski i in., 2019*). Po kwitnieniu tempo pobierania azotu z gleby ulega znacznej redukcji. W fazie nalewania ziarna głównym źródłem azotu dla ziarniaków są organy wegetatywne rośliny (*Subedi i Ma, 2005*).

Plonotwórcze działanie fosforu (P) wynika z pełnionych przez ten pierwiastek wielu funkcji metabolicznych i fizjologicznych w roślinie. Jest istotnym składnikiem nukleotydów i nośników energii metabolicznej, takich jak DNA (kwas deoksyrybonukleinowy), RNA (kwas rybonukleinowy), FMN (mononukleotyd flawinowy), FAD (dinukleotyd flawinoadeninowy), CoA (koenzym A), ATP (trifosforan adenozyne), ADP (difosforan adenozyne), NAD (dinukleotyd nikotyno-amidoadeninowy) i NADP (fosforan dinukleotydu nikotyno-amidoadeninowego) (*Marschner, 2012*). Roślina dobrze odżywiona fosforem wykształca silny, dobrze rozbudowany system korzeniowy. Akumulacja fosforu zachodzi progresywnie w całym okresie wegetacji, lecz w stadium BBCH 51, osiąga zaledwie 45% końcowej wartości (*Ciampitti i in., 2013*). Kukurydza wykazuje dużą wrażliwość na niedobór fosforu w młodszym fazach rozwojowych. Można to zjawisko zaobserwować podczas zimnej wiosny. Nocą gleba mocno się wychładza, a w ciągu dnia niedostatecznie nagrzewa. W takich warunkach następuje zakłócenie i spowolnienie tempa pobierania fosforu. Wskaźnikiem niedoboru są antocyjanowe przebarwienia na dolnych liściach (*fol. 1.2a*). Niedobór fosforu w trakcie kwitnienia może prowadzić do redukcji ziarniaków w kolbie (*Subedi i Ma, 2005; Mullins, 2009*). Obecność fosforu wraz z azotem w podstawowych związkach organicznych rośliny znajduje odzwierciedlenie w silnym wpływie współdziałaniu obu tych pierwiastków na plon roślin uprawnych. W kukurydzy współdziałanie to prowadzi do wzrostu efektywności stosowanego azotu, co udokumentowali *Schlegel i Havlin (2017)*, analizując wyniki 50-letniego doświadczenia z nawadnianiem kukurydzy, uprawianej w monokulturze.

a. fosfor – niedobór



b. potas – niedobór



Fot. 1.2 Klasyczne objawy niedoboru fosforu (a) i potasu (b) we wczesnych stadiach rozwoju kukurydzy.

Źródło: udostępnienie Witold Grzebisz.

Potas odpowiedzialny jest za gospodarkę wodną rośliny. Reguluje dobowy cykl pracy aparatów szparkowych, przez co roślina wykazuje większą tolerancję na okresowe niedobory wody. Intensywne pobieranie tego składnika rozpoczyna się w stadium BBCH 16 i trwa, aż do pełnego wykształcenia wiechy. W tym okresie wegetacji kukurydzy akumulacja potasu przewyższa akumulację azotu. Maksimum akumulacji tego składnika przypada na kwitnienie, osiągając około 90% wartości końcowej (Ciampitti i in., 2013). Karłowacenie roślin, nekrozy brzegowe liści, a przy jednoczesnym niedoborze wody, pozwijane rurkowato liście wskazują na duży niedobór potasu (fot. 1.2b).

Uzyskanie dużego plonu ziarna kukurydzy jest uwarunkowane potrzebami pokarmowymi i optymalizacją warunków pobierania składników pokarmowych (tab. 1.1. i 1.2). W grupie podstawowej, krytycznej dla uzyskania założonego plonu ziarna, poza N, P i K, znajdują się także magnez (Mg) i siarka (S) (Benton Jones, 2003; Grzebisz, 2012). Kukurydza wykazuje duże wymagania również względem mikroelementów. Najważniejszymi z tej grupy są Zn i B. Duże zapotrzebowanie na Zn ujawnia się już w stadium 5-6 liścia, a następnie we wczesnej fazie nalewania ziarna. Niedobór cynku w wczesnych fazach rozwojowych prowadzi do ograniczenia wzrostu systemu korzeniowego, a w późniejszym terminie do redukcji liczby ziarniaków w kolbie (Grzebisz i in., 2008). Bor w fazie kwitnienia jest niezbędny w procesie kielkowania i wzrostu łagiewki pyłkowej. Niedobór tego pierwiastka prowadzi do

zakłócenia procesu formowania kolby, wywołując zjawisko zwane guzikowatością kolby. Rośliny dobrze odżywione mikroelementami zwiększają akumulację azotu, co bezpośrednio wpływa na wzrost plonu (*Maziarek i Krawczyk, 2015; Potarzycki i Grzebisz, 2021*).

Tabela 1.1. Średnie pobranie jednostkowe oraz całkowite pobranie makroelementów z plonem kukurydzy¹

Plon ziarna t ha ⁻¹	Średnie pobranie jednostkowe, w kg t ⁻¹ ziarna + słoma					
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	MgO	S	CaO
	20-32	8-10	22-32	4-6	3-4	4-5
Zapotrzebowanie całkowite dla założonego plonu, kg ha ⁻¹						
6	120-192	48-60	132-192	24-36	18-24	24-30
8	160-256	64-80	176-256	32-48	24-32	32-40
10	200-320	80-100	220-320	40-60	30-40	40-50

¹Grzebisz (2012)

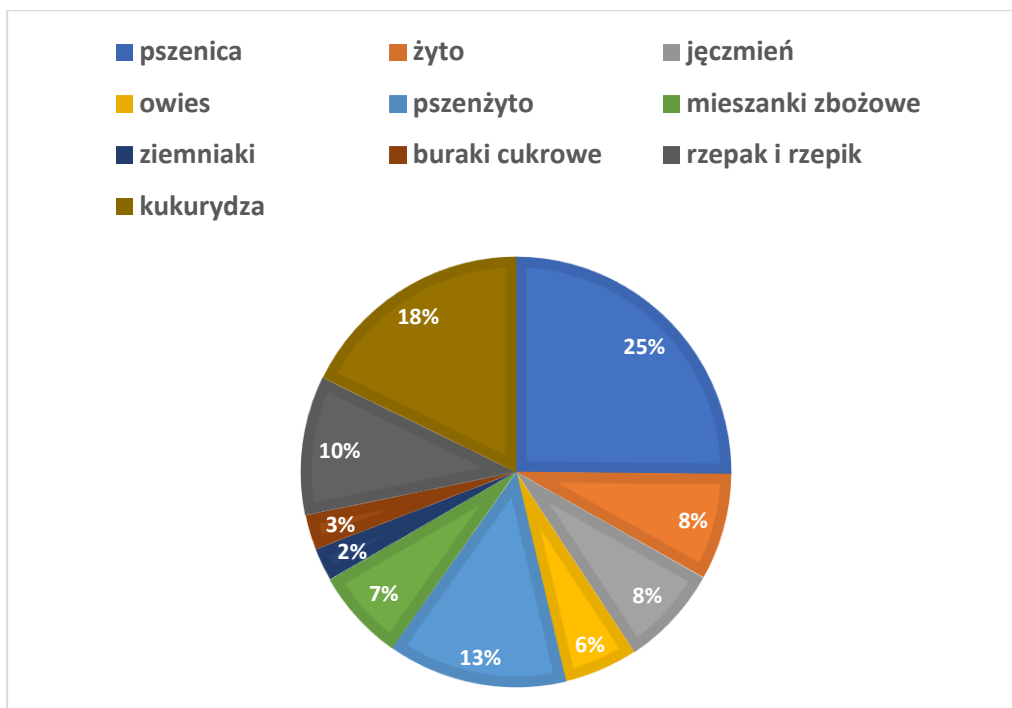
Tabela 1.2. Całkowite pobranie mikroelementów z plonem kukurydzy¹

Plon ziarna t ha ⁻¹	Średnie pobranie przez kukurydzę					
	Zn	B	Cu	Mn	Fe	Mb
	g ha ⁻¹					
6	300	120	70	220	1350	6
10	500	200	115	350	2250	6

¹Grzebisz (2012)

1.3.4. Areal uprawy i plony kukurydzy w Polsce

Kukurydza jest jedną z najczęściej uprawianych roślin na całym świecie. Plasuje się na trzecim miejscu pod względem powierzchni uprawy, ustępując tylko ryżowi i pszenicy (*FAOSTAT, 2023*). Ciągły postęp hodowlany i dostosowywanie odmian do warunków klimatycznych, panujących w danym regionie geograficznym pozwala na coraz większe wykorzystanie potencjału plonowania tej rośliny. W Polsce kukurydza pod względem arealu uprawy zajmuje drugie miejsce (ryc. 1.1). W 2022 roku uprawa tej rośliny zajmowała 1 196 tys. ha (*GUS, 2023*). Kukurydza jest gatunkiem, który posiada bardzo duży potencjał plonowania. Pomimo ciągłego postępu hodowlanego plony, które polski rolnik uzyskuje, nadal nie spełniają potencjału plonotwórczego kukurydzy (*Wicki, 2010a*).



Ryc. 1.1. Udział poszczególnych gatunków uprawnych w Polsce w roku 2022

Źródło: Opracowanie własne na podstawie danych z GUS z roku 2023.

Z analizy tab. 1.3 wynika, że potencjał plonowania kukurydzy w Polsce w latach 2014-2022 mieścił się w przedziale od 7,7 do 12,8 t ha⁻¹. Potencjalne plony w Polsce są zmienne, zależne od warunków atmosferycznych jakie panują w sezonie wegetacyjnym. Średnie plony rzeczywiste w Polsce w tych latach według danych GUS (2023) kształtowały się na dużo niższym poziomie, mieszcząc się w zakresie 4,71 – 7,47 t ha⁻¹. Pomimo znacznego postępu biologicznego i technologicznego w uprawie kukurydzy plony w przedstawionych latach nie wykazały dużej zmienności. Wyraźnie widoczna jest luka plonu, która w omawianym okresie wyniosła średnio 5 t ha⁻¹, między plonem realnie zbieranym przez rolnika w Polsce w stosunku do plonu potencjalnego. Oznacza to, że statystyczny Polski rolnik, uprawiający kukurydżę, zbierał w omawianym okresie około 57 % możliwego do uzyskania plonu ziarna. Najmniejsza luka w plonie wystąpiła w roku 2015 i wyniosła 2,94 t ha⁻¹. Spowodowane to było niekorzystnymi warunkami atmosferycznymi.

Luka plonu (LP) może być określana jako różnica plonów potencjalnych a plonów jakie uzyskuje rolnik uprawiający kukurydżę. Wyrażana jest w t ha⁻¹. Rzeczywista luka plonu została wyliczona na podstawie różnicy plonu potencjalnego (plonu uzyskanego z wzorca dla kukurydzy w danym roku, PDO) i plonu rzeczywistego (średnie plony kukurydzy w danym roku jakie podaje GUS), (Wicki, 2008).

Tabela 1.3. Plony potencjalne i rzeczywiste kukurydzy w Polsce¹

Lata	Plony, t ha ⁻¹		Luka plonu, t ha ⁻¹	
	Potencjalne	Rzeczywiste	rzeczywista	względna
2014	11,86	6,59	5,27	0,44
2015	7,65	4,71	2,94	0,38
2016	12,73	7,29	5,44	0,43
2017	11,79	7,15	4,64	0,39
2018	11,92	5,99	5,93	0,50
2019	10,98	5,62	5,36	0,49
2020	11,88	7,21	4,67	0,39
2021	12,83	7,47	5,36	0,42
2022	11,17	7,11	4,06	0,36

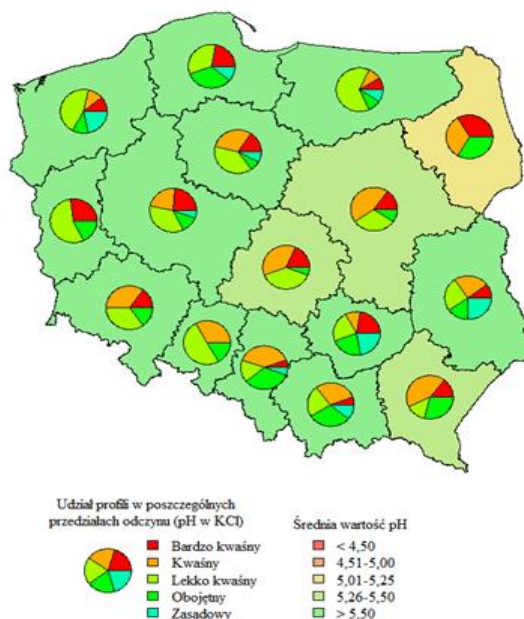
¹Źródło: Opracowanie własne na podstawie COBORU, PDO i GUS

1.3.5. Czynniki środowiskowe prowadzące do powstania luki plonu w Polsce

Kukurydza w okresie wegetacji jest narażona na działanie wielu, różnorodnych w swym zakresie czynników stresowych. Należą do nich czynniki abiotyczne, takie jak zbyt niska lub zbyt wysoka temperatura, a w warunkach klimatycznych Polski częściej niedobór wody, zbyt małe lub zbyt silne nasłonecznienie, niski odczyn gleby. Do stresowych czynników biotycznych można zaliczyć wirusy, bakterie, grzyby oraz owady (*Weidner, 2015*).

Roślina uprawna do prawidłowego wzrostu i wykorzystaniu w pełni swojego potencjału plonowania potrzebuje w pierwszej kolejności gleby o uregulowanym odczynie. Przekłada się to bezpośrednio na wielkość wyprodukowanej masy nadziemnej. Przy niskim odczynie w glebie pojawia się toksyczny glin, który redukuje system korzeniowy roślin uprawnych, prowadząc do drastycznego spłycenia warstwy gleby przerośniętej korzeniami (*Barłóg i in., 2022*). Odczyn gleby w Polsce jest ważnym czynnikiem ograniczającym wykorzystanie potencjału plonowania kukurydzy. Optymalny odczyn, gwarantujący optymalny rozwój kukurydzy kształtuje się w zakresie 6,0–7,5 (*Holubowicz-Kliza, 2006*). Znaczną część gleb Polski cechuje kwaśny lub bardzo kwaśny odczyn gleby (ryc. 1.2). Z badań przeprowadzonych w latach 2014–2015 wynika, że 28,9 % gleb uprawnych w Polsce wykazuje odczyn bardzo kwaśny, a 28,3% kwaśny (*Ochal i in., 2020*). W roku 2020, według *GUS (2020)*, zużycie nawozów wapniowych wyniosło 90 kg CaO ha⁻¹. Taka dawka wapna dalece odbiega od

potrzeb wapnowania, jakie wykazują użytki rolne w Polsce. W wielu województwach taki poziom zużycia nawozów wapniowych nie pozwala na neutralizację naturalnych czynników zakwaszających glebę. Konsekwencją niskiego poziomu zużycia nawozów wapniowych jest ujawnienie się szeregu procesów, zmniejszających wykorzystanie innych składników pokarmowych, niezbędnych dla prawidłowego wzrostu kukurydzy. Każdy niewykorzystany kilogram składnika pokarmowego ma także swoje konsekwencje ekonomiczne i środowiskowe (Lipiński, 2019)

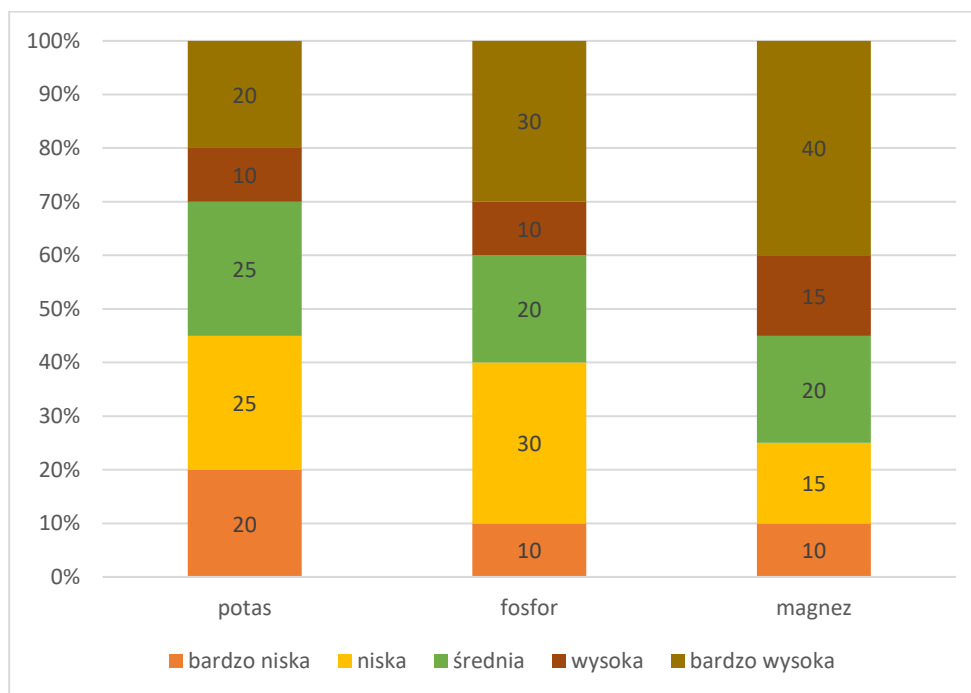


Ryc. 1.2. Przestrzenne zróżnicowanie odczynu gleb w Polsce w 2020 (pH w 1M KCl)

Źródło: https://www.gios.gov.pl/chemizm_gleb/index.php?mod=wyniki&cz=B

Kolejnym czynnikiem, efektywnie kontrolującym produktywność azotu, jest potas (Grzebisz i in., 2013). Zawartość przyswajalnego K w glebie jest jednym z podstawowych elementów oceny jakości gleb w Polsce. Niedobór tego składnika pokarmowego prowadzi do spadku żyzności gleby (Fotyma i in., 2000). W Polsce przeważają gleby lekkie o małym kompleksie sorpcyjnym, czyli o niskim potencjale do akumulacji kationów (Monitoring Chemizmu Gleb Ornych Polski, 2020). Dobre odżywienie roślin uprawnych potasem zwiększa ich tolerancję na niedobory wody, co przekłada się na większe plony (Rutkowska, 2015). W 2020 roku średnia zasobność gleb uprawnych w przyswajalny potas wyniosła 15,5 mg K₂O 100g⁻¹ (ryc. 1.3; Monitoring Chemizmu Gleb Ornych Polski, 2020). Średnie zużycie nawozów potasowych w 2020 roku wyniosło natomiast zaledwie 37,4 kg K₂O ha⁻¹ (GUS, 2023). Taki poziom nawożenia tym składnikiem jest zbyt mały w stosunku do potrzeb

pokarmowych roślin wysokoplonujących roślin uprawnych w tym kukurydzy. Taką dawkę potasu można potraktować jako zwrot składnika, jaki rolnik wynosi z pola z plonem. Jeżeli rolnik pozostawia słomę zbóż lub liście buraków cukrowych na polu to w procesie mineralizacji jony K^+ uwalniane są do roztworu glebowego, stając się tym samym cennym źródłem dla rośliny następczej (Grzebisz, 2012 i 2015).



Ryc. 1.3. Procentowy udział poszczególnych klas zasobności w przyswajalne formy potasu, fosforu i magnezu w 2020 roku.

Źródło: Opracowanie własne na podstawie Monitoringu Chemizmu Gleb Ornych Polski rok 2020.

Fosfor jest składnikiem pokarmowym szczególnie ważnym dla kukurydzy, zwłaszcza plonującej na wysokim poziomie. Rośliny uprawne pokrywają tylko niewielki procent swoich potrzeb pokarmowych z bieżąco zastosowanego nawozu. Pozostałą część zapotrzebowania na ten składnik uzupełniają z rezerw glebowych oraz z resztek roślinnych przedplonu (Sharpley, 1995; Potarzycki, 2003). Jak podaje Ochal (2015) około 30% przeanalizowanych prób glebowych w Polsce charakteryzuje się zawartością fosforu na poziomie bardzo niskim i niskim (ryc. 1.3). Średnia zasobność gleb uprawnych w fosfor w przeprowadzonych badania w 2020 roku wyniosła $14,7 \text{ mg P}_2\text{O}_5 \cdot 100 \text{ g}^{-1}$ gleby i w znaczący sposób nie zmieniła się na przestrzeni lat (Monitoring Chemizmu Gleb Ornych Polski). Średnie zużycie nawozów fosforowych w 2020 roku dla Polski wyniosło natomiast $24 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$. Największe zastosowanie tego składnika odnotowano w województwach opolskim i kujawsko-pomorskim. Najmniej nawozów

zawierających fosfor zastosowano natomiast w województwie lubuskim i warmińsko-mazurskim (GUS, 2020).

1.3.6. Siarka – potrzeby pokarmowe – źródła nawozowe

Potrzeby pokarmowe roślin względem siarki są zróżnicowane i zależą od uprawianego gatunku i fazy rozwojowej rośliny. Dobre odżywienie roślin uprawnych siarką przekłada się bezpośrednio na wyniki produkcyjne. Kukurydza wykazuje zapotrzebowanie na siarkę w ilości 3-4 kg S t⁻¹. Okres krytycznego zapotrzebowania na opisywany składnik przypada na fazy kwitnienia i wzrostu ziarniaka (Grzebisz, 2012).

Roślina pobiera siarkę w gleby w formie nieorganicznej (SO₄²⁻), której udział stanowi zaledwie około 5% całkowitej masy siarki w glebie mineralnej. Pozostała część składnika jest związana z masą organiczną gleby i dlatego nie jest bezpośrednio dostępna dla roślin. O dostępności siarki siarczanowej w glebie dla rośliny decydują procesy mineralizacji siarki organicznej z jednej strony i immobilizacji z drugiej (Kertesz i Mirleau, 2004). Siarka w roślinie pełni szereg istotnych funkcji fizjologicznych i metabolicznych. Jest obecna w kluczowych związkach organicznych rośliny takich jak aminokwasy siarkowe (metionina i cysteina), glutation, ferredoksyna czy specyficzne olejki eteryczne (Zhao i in., 2003; DeKok i in., 2005). Siarka, pomimo że nie jest traktowana w praktyce rolniczej jako składnik pierwszoplanowy, odgrywa bardzo ważną rolę w żywieniu roślin. Bierze udział w pierwotnym metabolizmie roślin i syntezie wtórnych produktów przemiany materii. Wraz z azotem i fosforem odgrywa istotną rolę w syntezie białek. Siarka zwiększa ilość białka surowego w płodach rolnych przy jednoczesnym zmniejszaniu zawartości azotanów, co tym poprawia jakość żywności i paszy dla zwierząt (Rausch i in., 2005).

Objawy niedoboru siarki są bardzo podobne do objawów niedoboru azotu, ponieważ związane są z niedoborami białka i chlorofilu (fot. 1.3b). Siarka nie jest ruchliwa w roślinie w takim stopniu jak azot, fosfor i potas. Z tej też przyczyny, objawy niedoboru w pierwszej kolejności ujawniają się na młodszych, lecz w pełni wykształconych liściach. Rośliny u których wystąpił głęboki niedobór siarki są skarłowaciałe (Grant i Hawkesford, 2015). Niedobór siarki w roślinie uprawnej prowadzi do utraty plonu. Potencjał plonowania rośliny nie może być zrealizowany przy niedostatku siarki w glebie, niezależnie od stanu zasobności gleby w inne składniki pokarmowe. Dobre odżywienie roślin siarką poprawia gospodarkę hormonalną rośliny, co przekłada się na optymalny rozwój. W wyniki bezpośredniego oddziaływania siarki

na szereg procesów zachodzących w roślinie, w tym tworzenia chlorofilu, niedobór będzie skutkował utratą plonu i gorszą jakością płodów rolnych (*De Kok i in., 2005*).

Siarka odgrywa ważną rolę w formowaniu plonu rolniczego. Jest składnikiem pokarmowym odpowiedzialnym także za odporność roślin na stresy środowiskowe. Niedobór siarki prowadzi zarówno do spadku ilości pobieranego azotu. Ponadto zmniejsza się wykorzystanie pobranego przez roślinę azotu, co bezpośrednio przekłada się na redukcję plonu oraz spadek jakości użytkowej (*Scherer, 2001*). Wykorzystanie azotu przez kukurydzę jest bardziej efektywne w warunkach dobrego odżywienia siarką (*Fotyma, 2003*). Siarka w nawożeniu uważana jest jako składnik pokarmowy odpowiedzialny za jakość plonów (*Sutar i in., 2017; Klikocka i Marks, 2018*).

a. magnez – niedobór



b. siarka – niedobór



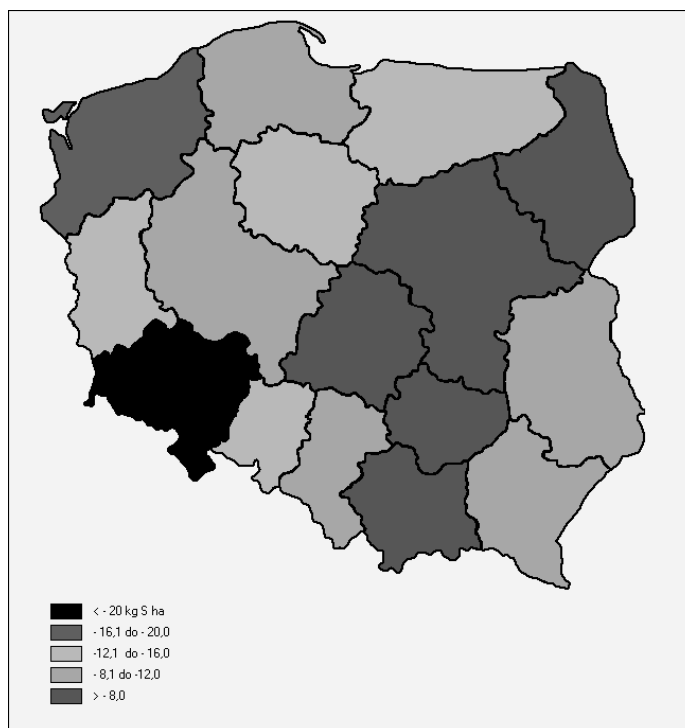
Fot. 1.3. Objawy niedoboru magnezu (a) i siarki (b) w kukurydzy.

Źródło: udostępnienie Witold Grzebisz.

Niska zasobność gleb w przyswajalną siarkę jest problemem ogólnoswiatowym. Powodem tego zjawiska jest duży eksport biomasy z pola oraz działanie szeregu czynników, takich jak wymywanie, erozja, utlenienie do SO_2 , czy redukcja do siarkowodoru, H_2S (*Eriksen i in. 1998*). Obserwowany od lat 90-tych XX wieku, zmniejszony dopływ siarki do gleby z atmosfery spowodowany był spadkiem zużycia węgla kamiennego i brunatnego, czy też użytkowaniem płynnych paliw o zredukowanej zawartości tego pierwiastka. Ważnym działaniem proekologicznym było wdrożenie rozwiązań technologicznych w elektrowniach, redukujących emisję związków siarki do atmosfery (*Podleśna, 2002*).

Zmniejszona depozycja atmosferyczna siarki w znacznym stopniu zubożyła gleby uprawne w ten składnik pokarmowy. Gleby użytkowane rolniczo w Polsce cechują się niską zawartością siarki siarczanowej. Wynika to ze zmniejszonego

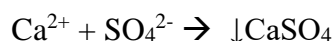
dopływu siarki z gazowych zanieczyszczeń atmosfery, które w ubiegłym wieku były głównym źródłem dopływu siarki w glebach uprawnych (Podleśna, 2002 i 2010). Zmniejszenie stosowania nawozów naturalnych, pestycydów siarkowych oraz stosowanie skoncentrowanych nawozów mineralnych również powoduje zmniejszenie masy siarki pośrednio dopływającej do glebie. Deficyt siarki w glebie stał się istotnym problemem w produkcji roślinnej ostatnich dwóch dekad w Polsce (Podleśna, 2013). Z tego powodu siarka w rolnictwie polski nabiera coraz większego znaczenia. Zawartość składników pokarmowych w tym siarki w nawozach naturalnych jest bardzo zróżnicowana. Zależy od gatunku zwierzęcia, składu paszy, systemu produkcji oraz warunków i czasu składowania danego nawozu. Zawartość siarki w oborniku i gnojowicy mieści się w przedziale $0,15 - 0,7 \text{ kg S t}^{-1} \text{ m}^{-3}$ (Eriksen 2003). Saldo bilansowe siarki w Polsce wykazuje duże zróżnicowanie i głównie wynika z powierzchni uprawy rzepaku ozimego (ryc. 1.4).



Ryc. 1.4. Saldo bilansowe siarki dla glebach obsiewanych, lata 2013-2015 (Przygocka-Cyna i Grzebisz, 2017).

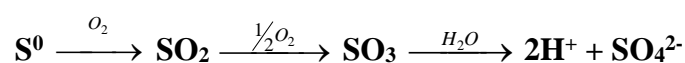
Wartość salda bilansowego siarki w latach 2012-2015 była ujemna, wynosząc średnio dla Polski $-11,3 \text{ kg S ha}^{-1}$. Średnio roczny niedobór siarki wynosi natomiast około 133 tys. t.. Jest to wartość równoznaczna z 785 tys. t syntetycznego siarczanu wapnia. Stan zapotrzebowania rolnictwa na siarkę w Polsce jest stabilny w ostaniem 10-leciu (Przygocka-Cyna i Grzebisz, 2017). Zasoby tzw. siarki mineralnej w glebie, czyli

zawartość S-SO₄, gdyż w takiej postaci jest ten składnik pobierany przez rośliny z gleby, zależą od odczynu, który działa pośrednio, gdyż określa stężenie kationów wiążących jony SO₄²⁻. Największe stężenie tzw. wolnych siarczanów w glebie występuje w zakresie odczynu obojętnego, czyli dla pH w zakresie od 6,5 do 7,2. W takich warunkach odczynu gleby w okresie półrocza zimowego może dochodzić do wymywania siarczanów z gleby (Kulczycki, 2021). W glebach o odczynie zasadowym dochodzi natomiast wytrącania siarczanu wapnia z roztworu glebowego:



Plony roślin uprawnych oraz ich jakość użytkowa w znacznym stopniu zależy od odpowiedniego zaopatrzenia roślin uprawnych w siarkę. W praktyce rolniczej należy ten składnik systematycznie uzupełniać, aby uniknąć straty plonu. Stosowanie siarki najczęściej odbywa się w połączeniu z nawożeniem innymi składnikami pokarmowymi. Nawożenie siarką powinno wyprzedzać okresy krytyczne zapotrzebowania na ten składnik. Nawozy z siarką, stosowane bezpośrednio pod roślinę powinny cechować się wysoką i szybką dostępnością tego składnika (Grzebisz 2012). Nawozy, takie jak superfosfat prosty, siarczan amonu, kainit, siarczan potasu zawierają siarkę w swoim składzie jako drugoplanowy składnik pokarmowy, a często jako technologiczny balast, czego klasycznym przykładem jest superfosfat prosty (tab. 1.4).

Ostatnie lata przyniosły zainteresowanie nawozami typu siarka elementarna i siarczan wapnia. W tych nawozach zawartości siarki jest duża, lecz jej dostępność dla roślin mała. Aby siarka elementarna stała się dostępna dla roślin musi zostać wprawdzie utleniona do SO₄²⁻. Siarka elementarna (S⁰) podlega w glebie biologicznym procesom utlenienia, które przebiegają stopniowo, wieloetapowo, jak przedstawiono poniżej:



Szybkość uwalniania siarki siarczanowej z siarki elementarnej zależy od szeregu czynników środowiska, w tym od (Lucheta i Lambais 2012; Kulczycki, 2021):

- 1) temperatury gleby; wydajność procesu zależy od temperatury; wartość krytyczna 10 °C;
- 2) wilgotności gleby; proces przebiega intensywnie w glebach o wilgotności zbliżonej do PPW (około 60% całkowitej pojemności wodnej gleby);
- 3) zawartości materii organicznej; im więcej świeżej materii organicznej, która jest źródłem energii dla mikroorganizmów, tym szybciej przebiegają procesy utleniania.

Tabela 1.4. Nawozy siarkowe mineralne obecne na rynku w Polsce¹

Rodzaj nawozu	Skład chemiczny	Zawartość S, składniki dodatkowe	Szybkość działania
Saletro-siarczan amonu	NH_4NO_3	N = 32%, S = 5%	Duża
Saletro-siarczan amonu	$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	N = 24% , S = 6%; CaO = 12%	Duża
Saletro-siarczan amonu		N = 26%, S = 13%	Duża
Siarczan amonu	$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	S = 24%; N = 20,5%	Duża
Superfosfat pojedynczy	$\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ + $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	S = 12%; P = 7-9% Ca = 13-20%	Umiarkowanie duża
Siarczan potasu	K_2SO_4	S = 18% K = 41%	Umiarkowanie duża
Siarczan magnezu	$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	S = 13%; Mg = 10%	Bardzo duża
Kizeryt	$\text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$	S = 23%; Mg = 17%	Duża
Korn-Kali	KCl + $\text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$	K = 33,2%; S = 4% Mg = 3,5%	Duża
Gips	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	S = 17 %	Mała
Siarka elementarna	S ⁰	S = 96%	zależy od wielkości cząstek

¹różne źródła

Opracowując system nawożenia siarką należy uwzględnić podstawowe założenia, wynikające z analizy trzech faktów (*Grzebisz i in., 2023*):

- 1) tylko rośliny dobrze odżywione azotem, fosforem, magnezem są w stanie efektywnie pobierać siarkę z gleby.
- 2) rośliny nie pobierają i nie akumulują nadmiernie siarki;
- 3) dopiero w stanie całkowitego pokrycia potrzeb pokarmowych, to znaczy w stanie „wysycenia” roślina jest w stanie w pełni wykorzystać ten składnik pokarmowy, zarówno do celów produkcyjnych, jak i obronnych w warunkach ujawnienia się stresów abiotycznych lub biotycznych.

Dopiero w tym miejscu należy zdefiniować, wyszczególnić cele główne i cele szczegółowe nawożenia siarką, jak i jednocześnie określić możliwość ich realizacji. Cele główny wynika z funkcji siarki w roślinie i sprowadza się do

- 1) wzrostu efektywności azotu;
- 2) uzyskanie wysokiej jakości produktów roślinnych, których walory użytkowe warunkuje odżywienie siarką.

Cele operacyjne systemu nawożenia siarką sprowadzając się do:

- 1) Uzupełnienie zasobów glebowych siarki siarczanowej do poziomu nie powodującego ujemnej reakcji rośliny na niedobór siarki w glebie; dobór nawozu siarkowego odgrywa rolę drugorzędą; poziom ten mieści się co najmniej w zakresie średnim, z optymalną zawartością w przedziale dużym;
- 2) Nalistne dokarmienie rośliny w okresie tuż przed wystąpieniem fazy krytycznej;
- 3) Inne, w tym szeroki aspekt działania siarki jako fungicydu i poprawa walorów użytkowych roślin uprawnych niespecyficznych dla tego składnika pokarmowego, przykładowo jakość mąki pszenicy.

1.3.7. Wapń w roślinie – źródła nawozowe wapnia

Wapń jest pobierany przez roślinę w formie Ca^{2+} z prądem transpiracyjnym wody i jest transportowany w ksylemie. Składnik ten nie podlega wtórnemu uruchomieniu w roślinie (remobilizacja), stąd też niedobór w pierwszej kolejności powoduje zakłócenie w funkcjonowaniu merystemów wierzchołkowych (pączków wzrostu) (White, 2003). Wapń wolno przemieszcza się w roślinie. Owoce, nasiona, ziarno będące na końcu sytemu transportu tego pierwiastka często są niedostatecznie zaopatrzone, gdyż dopływ składnika jest zbyt mały. Dlatego wapń musi być stale dostępny w strefie wzrostu korzenia. Nawożenie roślin gipsem jako nośnika wapnia może poprawić jakość plonów (White, 2015).

Wapń pełni w roślinie szereg funkcji, w tym jest elementem strukturalnym w ścianach komórkowych, w których jako kation łączy ujemnie naładowane cząstki organiczne. Jest bowiem podstawowym elementem blaszki środkowej komórki, zapewniając tym samym integralność tkanek, i organów. Jest istotnym składnikiem dla prawidłowego funkcjonowania pączków wzrostu, zarówno korzeniowych, jak i nadziemnych, gdyż jest niezbędny w procesie podziału komórek merystematycznych i ich późniejszą rozbudowę (Marschner, 2012; White, 2015). W ostatnim czasie rozpoznano funkcje wapnia jako nośnika informacji biologicznej w roślinie. Niewielkie różnice w stężeniu wapnia w roślinie, ściślej w cytoplazmie komórki, bezpośrednio kształtują reakcję rośliny na czynniki środowiskowe, w tym głównie stresogenne, na tempo wzrostu roślin (Thor, 2019).

Gips, czyli dwuwodny siarczan wapnia ($\text{CaSO}_4 \times 2\text{H}_2\text{O}$) zawiera 22-23 % Ca i 17-18 % S. Związek obecnie wykorzystywany w rolnictwie pochodzi z dwóch źródeł, to znaczy z naturalnych złóż gipsu oraz tzw. gipsu syntetycznego. Produkt ten

wytwarzany jest jako produkt uboczny przemysłu energetycznego. W rolnictwie najczęściej zużywa się obecnie gipsu syntetycznego (*Aakriti i in., 2023*). Gips jest produktem ubocznym powstałym w procesie odsiarczania spalin w elektrowniach węglowych. Otrzymywany jest poprzez wtryskiwanie tzw. mlecza wapiennego do spalin w celu wychwycenia dwutlenku siarki. Na skutek tej reakcji powstaje siarczyn wapnia, który następnie przekształca się w uwodniony siarczan wapnia (*Kairies i in., 2006*). Produkt końcowy tej reakcji zawiera > 95% siarczanu wapnia i jest zbliżony poziomem krystalizacji do drobno zmielonego węglanu wapnia. Gips otrzymywany jako produkt uboczny elektrowni węglowych jest często lepszej jakości niż gips wydobywany z pokładów naturalnych. Jego cząstki są drobniejsze i bardziej jednolite, oraz zawiera mniej metali ciężkich (*Srivastava i in., 2001; Smith i in., 2013*).

Rozpuszczalność siarczanu wapnia w glebie jest mała (2,6-3,2 g dm⁻³), a głównymi czynnikami warunkującymi ten proces są masa wody w glebie i koncentracja obu jonów w roztworze glebowym (*Lebedev, 2015*). W zależności od warunków wodnych w glebie, związek ten podlega cyklicznym procesom rozpuszczania i wytrącania z roztworu:



Gleby w Polsce są ubogie w oba te składniki pokarmowe, a więc wysycenie głębszych warstw gleby wodą winno stymulować procesy odpowiedzialne za uruchomieniu siarki i wapnia, co tym samym może sprawić, że oba te składniki będą dostępne dla rośliny (*Karlik, 1989*). Warunkiem koniecznym pobrania obu tych składników przez roślinę jest wytworzenie dostatecznie głębokiego systemu korzeniowego. Z uwagi na słabą rozpuszczalność $\text{CaSO}_4 \times 2\text{H}_2\text{O}$ w wodzie dostępność składników z nawozu wynika głównie z zawartości wody w glebie (*Chen i in., 2005; Chen i in., 2008*). Jednakże w porównaniu z wapnem węglanowym gips jest lepiej rozpuszczalny. Lepsza rozpuszczalność gipsu umożliwia transport jonów wapnia i siarki do strefy ukorzenienia roślin. Gips, oprócz dostarczenia roślinie uprawnej ważnych składników pokarmowych, poprawia właściwości fizykochemiczne gleby poprzez poprawę struktury agregatowej gleby przez co gleba wykazuje mniejszą podatność na zaskorupianie się. Poprzez poprawienie struktury gleby dochodzi do lepszej infiltracji wody opadowej w profilu glebowym. W wyniku tego zjawiska profil glebowy lepiej wysyca się wodą. Na skutek tego działania powstają warunki fizyczne, zapewniające lepszy rozwój systemu korzeniowego roślin, zwłaszcza w głębszych warstwach gleby (*Summer, 2009*). Dobra

struktura gleby pozwala na lepszy rozwój systemu korzeniowego co skutkuje lepszym wykorzystaniem wody i składników pokarmowych.

Gips również łagodzi działanie toksycznego glinu oraz zmniejsza straty fosforu z pól uprawnych (Watts i Torbert, 2009; Watts i Dick, 2014). Gips ogranicza działanie toksycznego glinu (Al^{3+}), lecz mechanizm tego zjawiska nie został jednoznacznie wytłumaczony, co jednakże przekłada się na lepszy rozwój systemu korzeniowego roślin. Te pozytywne korzyści płynące z zastosowanego gipsu zwiększają możliwość lepszego wykorzystania potencjału plonowania roślin (Donstova i in., 2005; Norton i in., 2007). Wapń pochodzący z gipsu może wiązać się z fosforem tworząc osad fosforanu wapnia tym samym może przyczyniać się wyłączenia tego składnika (tymczasowo) z obiegu, a tym samym prowadzić do poprawy jakości wód w zbiornikach wodnych otaczających pola uprawne. Ważne jest to zwłaszcza na terenach, na których stosuje się niezbilansowane dawki nawozów fosforowych, zwłaszcza obornika, i gnojowicy. Nachylenie terenu sprzyja przedostawaniu się związków fosforu do wody, co wywołuje eutrofizację wód sródlądowych. Niewielka dawka gipsu znacząco zmniejsza ryzyko wystąpienia takiego zjawiska (Favaretto i in., 2006).

Biorąc pod uwagę szerokie korzyści ze stosowania gipsu można włączyć ten produkt w program nawożenia roślin w celu poprawy warunków zrównoważonego rozwoju produkcji rolnej. Korzyści wynikające ze stosowania gipsu są krótko- i długofalowe i zależą od celów jego stosowania. Korzyści żywieniowe roślin (tj. nawożenie siarką) związane z gipsem są krótkotrwałe (1-2 lata) i polegają na stosowaniu mniejszych dawek. Zmiany właściwości fizycznych i chemicznych gleby są natomiast długo-okresowe i często wymagają powtarzalności w stosowaniu gipsu w większych dawkach, aby przyniosły korzyści w zakresie wzrostu plonów (Watts i in., 2014). Optymalizacja zastosowań gipsu w rolnictwie jest ważna, ponieważ duża część kosztów gipsu związana jest z transportem. Częste stosowanie gipsu w wyższych dawkach byłoby bardziej korzystne ekonomicznie. Chociaż istnieje wiele zalet ze stosowania gipsu na gruntach rolnych to ostatecznym czynnikiem jego zastosowania będzie ekonomika, gdyż koszty związane z transportem ciągle rosną (Kost i in., 2014).

1.3.8. Reakcja kukurydzy na azot

Azot jest niezbędnym składnikiem odżywczym dla kukurydzy i wyznacznikiem plonu ziarna. Roślina ta nie wykazuje jednak dużego jednostkowego pobrania azotu 3-4 kg N t⁻¹ (Podleśna, 2010; Grzebisz, 2012). Jednakże łączna akumulacja składnika przez

kukurydzę jest duża ze względu na wielkość wytwarzanej biomasy. Azot jest pobierany przez rośliny w formie jonu azotanowego (NO_3^-) i amonowego (NH_4^+), a następnie transportowany do części nadziemnych rośliny, ściślej liści. Czynniki środowiskowe i żywieniowe istotnie kształtują dynamikę pobierania i akumulacji składników pokarmowych, w tym N przez kukurydzę. Należą do nich: wilgotność, temperatura i struktura gleby oraz zbilansowanie z pozostałymi składnikami pokarmowymi, niezbędnymi do zamknięcia cyklu życiowego rośliny (Marschner, 2012).

Pełne wykorzystanie potencjału plonowania kukurydzy wymaga odpowiedniego zaopatrzenia rośliny w pozostałe składniki pokarmowe. Jeżeli gleba ma słaby kompleks sorpcyjny, to stosowanie większych dawek azotu nie przynosi wymiernych, produkcyjnych i ekonomicznych korzyści. Akumulacja składników pokarmowych przez kukurydzę wykazuje istotną reakcję na dawki azotu. Według *Bendera i in. (2013)*, kukurydza produkująca 23 t ha^{-1} (s.m.), w tym 12 t ha^{-1} ziarna (s.m.), akumuluje 286 kg N ha^{-1} , $114 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$, $202 \text{ kg K}_2\text{O N ha}^{-1}$, 59 kg Mg ha^{-1} , 26 kg S ha^{-1} oraz mikroskładniki w ilości Fe – $1,4 \text{ kg ha}^{-1}$, Mn i Zn po $0,5 \text{ kg ha}^{-1}$, $0,1 \text{ Cu kg ha}^{-1}$ i $0,08 \text{ kg B ha}^{-1}$. Takie składniki, jak P, S, Zn i Cu osiągają maksymalne wartości akumulacji po kwitnieniu, a pozostałe wymienione w tym zestawieniu, przed kwitnieniem.

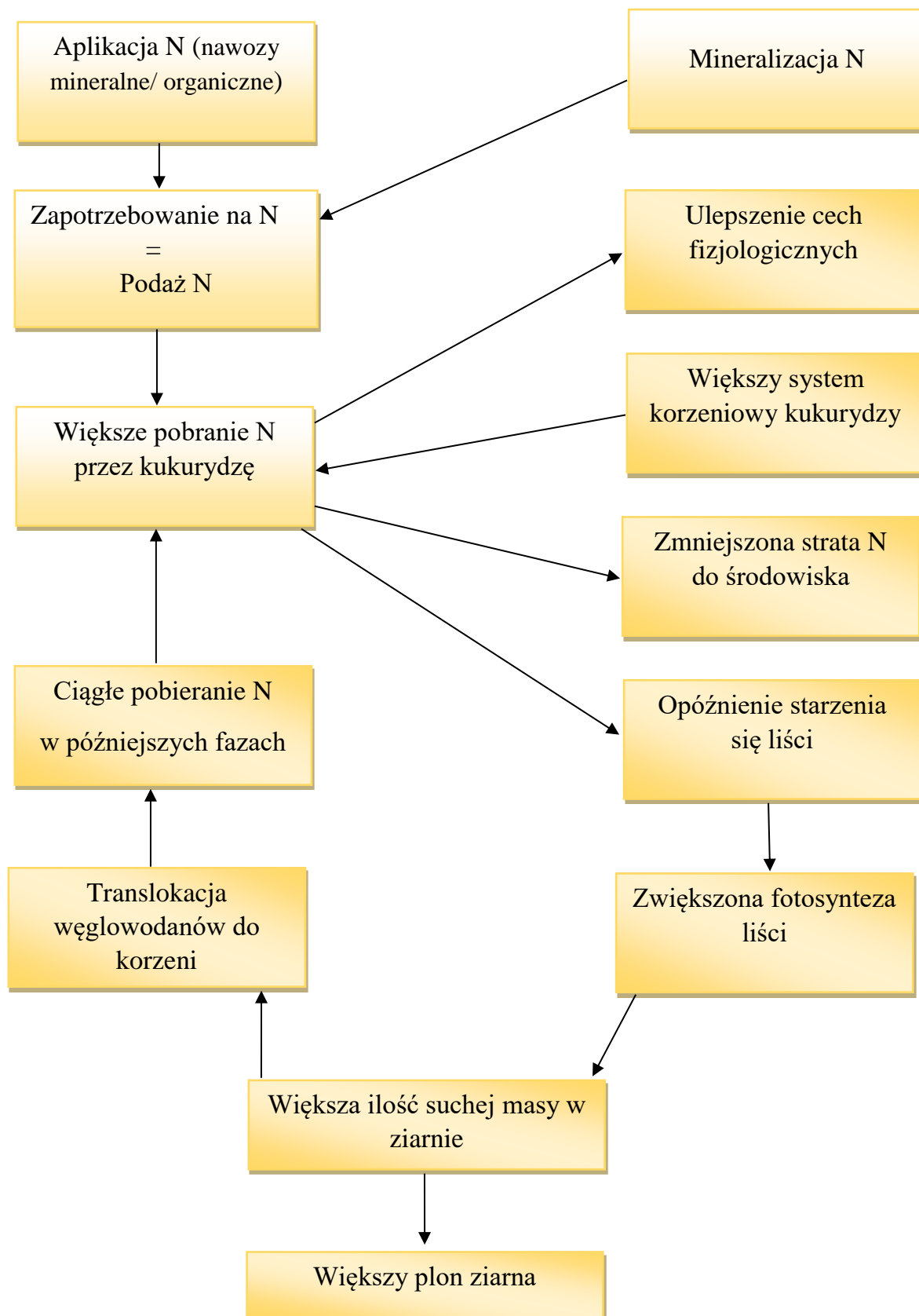
Zasymilowany przez roślinę N nieorganiczny podlega magazynowaniu w wakuoli, gdzie służy jako rezerwuuar, lecz głównie występuje w związkach organicznych w cytoplazmie i szerokiej gamie związkach strukturalnych. Początkowe pobranie N jest niewielkie. Do stadium BBCH 16-18 kukurydza akumuluje w biomase zaledwie 3 % całkowitej masy końcowej składnika w stadium dojrzałości fizjologicznej. W okresie intensywnego wzrostu kukurydzy przypadającego od stadium 8-go liścia do stadium zasychania znamion kukurydza akumuluje w swej masie około 85 % całkowitego zapotrzebowania na azot. Intensywność tego zjawiska wzrasta na kilka dni przed kwitnieniem i spada w momencie dojrzewania ziarna (*Dubas, 2004*). Maksymalne akumulacja N następuje w trakcie kwitnienia i zawiązywania ziarniaków (*Ciampitti i in., 2013; Pikula, 2014*). Proces ten prowadzi do zawiązania większej liczby ziarniaków w kolbie, a także zwiększa intensywność remobilizacji azotu z części wegetatywnych do ziarniaków (*Nasielski i in., 2029*). Pełne wykorzystanie potencjału plonowania kukurydzy wymaga zatem dobrej podaży i akumulacji azotu (*Hammad i in., 2017*).

Kukurydza posiada duże możliwości adaptacyjne do środowiska, w którym jest uprawiana. W stanowisku na glebie mało zasobnej w azot w początkowych fazach wegetacji zawęża się stosunek masy korzeni do masy pędu nadziemnego. Większy

rozwój systemu korzeniowego, zwłaszcza w początkowych fazach rozwoju zachodzi kosztem masy nadziemnej, lecz tym samym zwiększa potencjał rośliny do pobierania azotu z gleby (Wang, 2004; Peng i in., 2010). Akumulacja azotu w nadziemnej biomase kukurydza wykazuje dużą reakcję na zawartość azotu nieorganicznego (N_{min}) w glebie (Worku 2007). Zależności zachodzące między zapotrzebowaniem rośliny na azot a jej reakcją fizjologiczną przedstawiono na ryc. 1.5.

W trakcie wegetacji, kiedy zmniejsza się szybkość pobierania azotu z gleby lub, gdy pojawia się nowy akceptor fizjologiczny (liść, pączek wzrostu, organy generatywne: nasiona, owoce) związki azotu, zgromadzone w częściach wegetatywnych rośliny, podlegają wtórnemu uruchomieniu, czyli remobilizacji (Ning i in., 2017). Wydajna remobilizacja N i tzw. *efekt zielonego liścia* (Green Stay) to kluczowe cechy, które wywołały wzrost plonowania kukurydzy w ostatnim 50-leciu. Pięć istotnych cech różnicujących *stare* (1940-1950) i *nowe* (1991-2011) odmiany kukurydzy ma bowiem związek z gospodarką azotową tej rośliny (Ciampitti i Vyn, 2013):

- 1) Zmiana koncentracji azotu w ziarnie kukurydzy - kluczowy wskaźnik.
- 2) Wzrost udziału tzw. reproduktywnego azotu w ziarnie, czyli azotu pobieranego po kwitnieniu.
- 3) Masa remobilizowanego azotu w okresie nalewania ziarna zależy nie od masy azotu w częściach wegetatywnych, lecz od dynamiki wzrostu kolby.
- 4) Kompleksowa regulacja procesów w roślinie (akceptor-źródło) odpowiedzialnych za pobieranie azotu po kwitnieniu.
- 5) Wzrost koncentracji N w słomie odzwierciedla stan koncentracji składnika w ziarnie, niezależnie od typu odmiany, lecz tylko gdy zachodzi wzrost pobrania po kwitnieniu.



Ryc. 1.5. Fizjologia plonowania kukurydzy a zapotrzebowanie na azot.
 Źródło: Opracowanie własne na podstawie (Glass, 2003).

Powierzchnia i żywotność liści kukurydzy przed kwitnieniem istotnie kształtuje procesy zachodzące po kwitnieniu. W tym okresie wegetacji pojawia się nowy akceptor azotu, czyli ziarniaki. Jednocześnie pobieranie składnika z gleby ulega silnej redukcji, a tym samym akumulacja netto azotu jest mniejsza. Dotychczas dominowała teoria o ścisłym związku między dostępnością azotu w glebie, pobraniem po kwitnieniu a remobilizacją składnika z części wegetatywnych (*Racjan i in., 1999*). Obecnie dyskusja naukowa dotyczy relacji między wielkością akceptora azotu (liczba ziarniaków w kolbie i dynamika wzrost → masa ziarniaka) a zasobami składnika w roślinie (*Hisse i in., 2019*). Gdy proces remobilizacji azotu po kwitnienia przebiega prawidłowo, to wówczas dochodzi do intensywnej remobilizacji składnika z łodygi. Tym samym mniej azotu podlega remobilizacji z liści. Stan ten warunkuje, ściślej wydłuża aktywność fotosyntetyczną liści. Wysokie plony kukurydzy zależą bowiem od ciągłej, wydajnej fotosyntezy po okresie kwitnienia, przy jednoczesnym dobrym zaopatrzeniu roślin w azot (*Fernandez i in., 2021*).

Systemy nawożenia kukurydzy N są bardzo zróżnicowane. W praktyce rolniczej dominuje stosowanie całej masy składnika przed siewem i ewentualnie podział na dawkę przedsiewną i pogłówną stosowaną w początkowym okresie wegetacji (*Cao i in., 2018*). W wielu regionach świata, i to nie tylko w suchych, czy też półsuchych, testuje się obecnie podział dawki nawozowej azotu na przedsiewną i stosowaną w kilku mniejszych dawkach w pełni wegetacji, nawet w okresie od wyrzucania wiechy do kwitnienia (*Fernandez i in., 2020*). Jak podaje *Irmak i in., (2023)* podział dawki azotu, w tym stosowanie nawozu nawet w okresie wyrzucania wiechy zwiększa zawartość składnika w ziarnie, co tym samym poprawia jego wartość żywieniową, czy paszową.

W celu wyliczenia odpowiedniej dawki nawozu azotu należy w pierwszym etapie określić, jakie warunki siedliskowe panują na danym polu. Trzeba także określić poziom oczekiwanego plonu w tym stanowisku. Ważna jest również zawartość próchnicy i warunki mineralizacji w sezonie wegetacyjnym (*Osterholz i in., 2017*). Należy również wziąć pod uwagę ewentualny dopływ składnika ze źródeł organicznych i naturalnych. Analiza tych danych powinna dać odpowiedź na pytanie, jaką dawkę azotu należy zastosować? Jeżeli wynik tej analizy jest wysoki, to całkowite zapotrzebowanie kukurydzy na azot należy zmniejszyć, a dawkę całkowitą podzielić. Duże, jednorazowe dawki N dawki mogą bowiem zakłócić proces kiełkowania nasion. Natomiast stosowanie nawozu po wschodach może spowodować poparzenie liści (*Rutkowska, 2014; Krasulski, 2017*).

Reakcja kukurydzy na nawożenie azotu jest zmienna (*Księżak i in., 2012*). Według autorów tego artykułu, zwiększenie dawki o 40 kg N ha⁻¹ spowodowało wzrost plonu ziarna. Zastosowanie całkowitej dawki N w ilości 160 kg N ha⁻¹ spowodowało natomiast obniżkę plonu na skutek wylegania roślin. W latach suchych wzrost dawki o 80 kg N ha⁻¹ spowodował wzrost plonu o 3 t ha⁻¹ w stosunku do kontroli azotowej. Rośliny zareagowały dodatnio na nawożenie azotem także poprzez wzrost zawartości białka w suchej masie rośliny.

Wykorzystanie azotu przez kukurydzę z nawozów mineralnych jest niskie. Aby zwiększyć wykorzystanie należy umieścić nawóz w odpowiedniej odległości od korzenia. Stosowanie nawozów zawierających formę azotanową i amonową przed siewem w porównaniu do stosowania w stadium 5-tego liścia ma istotny wpływ na pobranie składnika. Według *Barłoga i in. (2020)* stosowanie w tych terminach mocznika nie wpływa w istotny sposób na pobieranie azotu przez roślinę. Dodatek siarki w systemie nawożenia kukurydzy azotem zwiększa pobranie i wykorzystanie azotu. Badania w tym kierunku przeprowadziła *Podleśna i in., (2017)*. W przeprowadzonym doświadczeniu najwyższy plon ziarna kukurydzy otrzymano przy dawce 160 kg N ha⁻¹. Zwiększenie dawki do 200 kg N ha⁻¹ spowodowało spadek plonu. Dodatek siarki spowodował zwiększenie plonów przy mniejszych dawkach azotu. Zastosowanie siarki w dawce 30 kg S ha⁻¹ skutkowało większym pobraniem i wykorzystaniem azotu z nawozu.

2. Materiały i metodyka

2.1. Lokalizacja doświadczenia i warunki glebowe

Doświadczenie polowe przeprowadzono w trzech kolejnych sezonach wegetacyjnych, a mianowicie 2020, 2021, 2022 w Gospodarstwie Rolnym w Lutomku, gmina Sieraków, powiat międzychodzki, województwo wielkopolskie. Lokalizacja doświadczenia 52° 36' 52" N, 16° 10' 26" E. Przedplonem kukurydzy była pszenica ozima. Doświadczenie założono na glebie płowej typowej, powstałej z piasku gliniastego lekkiego/bardzo lekkiego, zalegającym na piasku gliniastym lekkim (*Kabała i in., 2019*). Pod względem użytkowania rolniczego gleba to zaliczana jest do klasy bonitacyjnej IVb, kompleksu glebowego żytniego dobrego.



Ryc. 2.1. Zdjęcie satelitarne gospodarstwa z lokalizacją doświadczeń.

Źródło: opracowanie własne na podstawie: <https://www.google.pl/maps/>

2.2. Warunki agrochemiczne

Odczyn gleby w warstwie 0-30 cm mieścił się w zakresie lekko-kwaśnym. W głębszych warstwach notowano trend wzrostowy, lecz tylko w 2022 w warstwie 60-90 odnotowano wartość, mieszczącą się w zakresie obojętnym (tab. 2.1). Masa azotu mineralnego (suma N-NH₄ i N-NO₃; N_{min}) wynosiła 79, 70, 62 kg N ha⁻¹, odpowiednio w sezonie 2020, 2021 i 2022. Składnik ten był rozmieszczony równomiernie w glebie, lecz mniejsze wartości notowano w warstwie 30-60.

Zawartość podstawowych składników pokarmowych była stabilna w latach badań. Zawartość fosforu w warstwie 0-30 cm wahała się od 159 mg kg⁻¹ gleby w 2020

(klasa W) do 135 mg kg^{-1} gleby w 2021 (Śr). W głębszych warstwach notowano systematyczny spadek zasobności gleby w ten składnik, przy czym trend spadkowy był znacznie większy w 2020, niż w pozostałych latach. Zawartość przyswajalnego potasu, ogólnie, przedstawiała się na dobrym poziomie. Największe wartości w warstwie 0-30 cm odnotowano w 2021 (W) a najmniejsze w 2020 (Śr). Jednocześnie zawartość składnika w warstwie 60-90 cm była, co najmniej w klasie średniej. Stan ten wskazuje na dostatecznie dobre zasoby przyswajalnego potasu w glebie dla potrzeb kukurydzy (Grzebiś, 2012). Zawartość przyswajalnego magnezu była duża lub bardzo duża, wykazując trend wzrostowy z głębokością gleby. Natomiast zawartość przyswajalnego wapnia w każdej warstwie gleby i w każdym roku była bardzo niska (zgodnie z normami w Republice Czeskiej; Trávník i in., 1999). Zwłaszcza ekstremalnie niskie wartości notowano w 2021. W 2022 zawartość tego składnika mieściła się w klasie bardzo niskiej, lecz była znacznie większą, niż w poprzednich dwóch sezonach wegetacyjnych. Zawartość siarki siarczanowej na poziomie mierzalnym notowano tylko w warstwie 0-30 cm. Ogólnie była niska, co tym samym wskazuje na możliwość potencjalnej reakcji roślin na testowane nośniki siarki. Jednakże w 2022 zawartość składnika była 3-krotnie większa, niż w 2020.

Zawartość mikroskładników nie wykazywała większego zróżnicowania w latach badań. Zawartość przyswajalnego żelaza kształtowała się we wszystkich warstwach gleby na poziomie średnim (Zbiral, 2016). odnotowano jednak wyraźny trend spadkowy wraz z głębokością. Największą zawartość notowano oczywiście w warstwie 0-30 cm. Zawartość manganu kształtowała się na poziomie średnim, a ogólny trend z głębokością gleby był taki sam, jak dla żelaza. Zawartość cynku wykazała zmienność, głównie w warstwie 0-30 cm. W latach 2020 i 2022 mieściła się w klasie średniej, a w 2021 w niskiej. W głębszych warstwach gleby, pomimo zmienności, nie przekraczała klasy niskiej. Analogiczne trendy zmienności odnotowano dla miedzi. Dla obu tych pierwiastków odnotowano znacznie większe wartości w roku 2022 w stosunku do dwóch poprzednich sezonów wegetacyjnych.

Tabela 2.1. Charakterystyka gleby przed założeniem doświadczenia w latach 2020-2022.

Cecha gleby/lata i warstwy gleby, cm	2020			2021			2022		
	0-30	30-60	60-90	0-30	30-60	60-90	0-30	30-60	60-90
Odczyn gleby ¹ pH w 1M KCl	5,7±0,2	5,8±0,1	6,2±0,2	5,5±0,3	5,8±0,2	6,1±0,2	6,1±0,3	6,3±0,2	6,7±0,3
Azot mineralny ² , kg ha ⁻¹	31±9	20±6	28±11	24±6	18±4	22±8	24±10	16±6	22±5
Fosfor ^{3,4} , mg P kg ⁻¹	159±4,5	40±12,5	27±3,8	135±5	50±5	39±2	144±18	64±16	22±12
	W ⁵	BN	BN	Śr	N	BN	Śr	N	BN
Potas ^{3,4} , mg K kg ⁻¹	139±1,7	112±5,4	150±2,0	196±23	133±11	125±5	166±21	139±12	130±4
	Śr	Śr	W	BW	Śr	Śr	W	Śr	Śr
Wapń ^{3,4} , mg Ca kg ⁻¹	264±28	163±23	298±85	241±22	126±12	154±30	375±72	310±33	537±34
	BN	BN	BN	BN	BN	BN	BN	BN	BN
Magnez ^{3,4} , mg Mg kg ⁻¹	93±12	98±5	247±42	89±7	68±4	84±2	117±7	148±44	267±9
	W	BW	BW	W	W	W	BW	BW	BW
Siarka siarczanowa ⁶ S-SO ₄ , mg S kg ⁻¹)	1,6±0,2	< 0,1	< 0,1	1,8±0,4	< 0,1	< 0,1	4,8±0,4	< 0,1	< 0,1
	N			N			N		
Żelazo ^{3,7} , mg Fe kg ⁻¹	243±8	154±46	126±10	208±23	145±9	135±11	243±14	170±15	124±10
	Śr	Śr	Śr	Śr	Śr	Śr	Śr	Śr	Śr
Mangan ^{3,7} , mg Mn kg ⁻¹	90±11	54±14	47±14	74±17	50±10	58±5	96±9	54±3	34±7
	Śr	Śr	Śr	Śr	Śr	Śr	Śr	Śr	Śr
Cynk ^{3,7} , mg Zn kg ⁻¹	3±0,6	1±0,4	0,9±0,1	2±0,2	1,2±0,1	1,1±0,1	4±0,2	2±0,9	0,8±0,1
	Śr	N	N	N	N	N	Śr	N	N
Miedź ^{3,7} , mg Cu kg ⁻¹	2±0,3	1±0,1	0,9±0,2	1,3±0,3	1,1±0,1	1,0±0,1	3±0,5	2±0,9	1±0,1
	Śr	N	N	N	N	N	Śr	N	N

¹pH w 1 m KCl; ²wyciąg 0,01M CaCl₂ (Bartłóg i in., 2017); ³Mehlich 3 (1984); ⁴Kęsik, 2016); ⁵klasy zasobności⁵: BN – bardzo niska; N – niska; Śr – średnia; W – wysoka;

⁶Lipiński, 2019; ⁷Zbiral (2016).

2.3. Schemat doświadczenia

Badania realizowano na bazie dwóch doświadczeń polowych, w tym, pierwsze prowadzone w naturalnych warunkach opadowych (doświadczenie nienawadniane) i drugie, w którym rośliny deszczowano w warunkach niedoboru wody (doświadczenie nawadniane). Doświadczenie polowe, dwu-czynnikowe założono w układzie bloków losowych (Trętowski i Wójcik, 1988; Mańkowski, 2017). Czynniki doświadczenia:

- I. Systemy nawożenia siarką:
 1. NPK bez siarki;
 2. NPK + siarka w formie elementarnej (S^0);
 3. NPK + siarka w postaci siarczanu wapnia ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$);
- II. Sześć dawek azotu: 0, 40, 80, 120 160, 200 $kg\ ha^{-1}$.

Pojedyncze doświadczenie polowe składało się z 18 wariantów doświadczalnych, realizowanych w czterech powtórzeniach, co dało łącznie 72 poletka dla jednego doświadczenia. W sumie badania prowadzono na 144 poletkach. Czynniki doświadczalne były w pełni rozlosowane, a powierzchnia pojedynczego poletka wynosiła 120 m^2 o wymiarach 6 × 20 m. Siew kukurydzy odmiany *Cirrus* przeprowadzano w terminach optymalnych dla regionu (zał. 2.1). Norma wysiewu dla badanych odmian wynosiła 8 sztuk żywych nasion m^{-2} . Zbiór kombajnem przeprowadzono z całego poletka.

2.4. Zabiegi agrotechniczne

W zał. 2.1 przedstawiono zabiegi agrotechniczne oraz ochrony roślin łącznie z dawkami oraz terminami stosowania nawozów, siewu, pestycydów, deszczowania i zbioru. Zabiegi agrotechniczne wykonywano przy optymalnych warunkach glebowych. Nawozy zostały zastosowane i wymieszane z glebą odpowiednio dwa tygodnie wcześniej, aby zapewnić ich dostępność dla roślin. Wszystkie nawozy zostały zastosowane rzutowo. Zastosowany pogłównie nawóz azotowy dla poziomów nawożenia 160 i 200 został zastosowany bezpośrednio przed deszczem, aby maksymalnie ograniczyć możliwe straty azotu. Terminy nawadniania zostały dostosowane tak, aby wykluczyć stres rośliny związany z niedoborem wody.

W przeprowadzonym doświadczeniu tylko kontrola absolutna nie była nawożona żadnym składnikiem pokarmowym. Pozostałe objekty, zgodnie z planem badawczym, zostały nawożone mocznikiem z inhibitorem urezay. Natomiast pozostałe składniki pokarmowe były wprowadzane w równej ilości dla wszystkich obiektów

doświadczalnych. Zastosowano 86 kg ha⁻¹ fosforu, 120 kg ha⁻¹ potasu, 83 kg ha⁻¹ tlenku magnezu, 84 kg ha⁻¹ tlenku wapnia na wszystkich obiektach z wyjątkiem kontroli absolutnej. Na obiektach nawożonych siarką zastosowano 68 kg ha⁻¹ S w odpowiedniej formie dla danego czynnika doświadczenia. Azot zastosowano w dawkach analogicznych do zakładanych sześciu poziomów nawożenia. W tab. 2.2 zestawiano masę zastosowanych nawozów.

Tabela 2.2. Dawki stosowania nawozów, kg poletko⁻¹.

Nawóz/ Czynniki	NPK		NPK-S0		NPK-CaS	
Węglan wapnia, 40%	3,53		3,53		0	
Siarka elementarna	0		1,2		0	
Siarczan wapnia	0		0		4,8	
Tlenek magnezu			1,2			
Sól potasowa 60%			2,4			
Fosforan amonu			2,24			
Nawóz/ Czynniki	N0	N40	N80	N120	N160	N200
Mocznik z NBPT	0	0,16	1,2		2,25	
		0			1,05	2,09

Źródło: opracowanie własne.

Azot stosowano w postaci mocznika z inhibitorem ureaz. UltraGRAN N46. „Nawóz WE” w postaci białych granuli. Zawiera 46 % azotu w formie amidowej. Granula pokryta jest inhibitorem ureazy (*karta charakterystyki*).

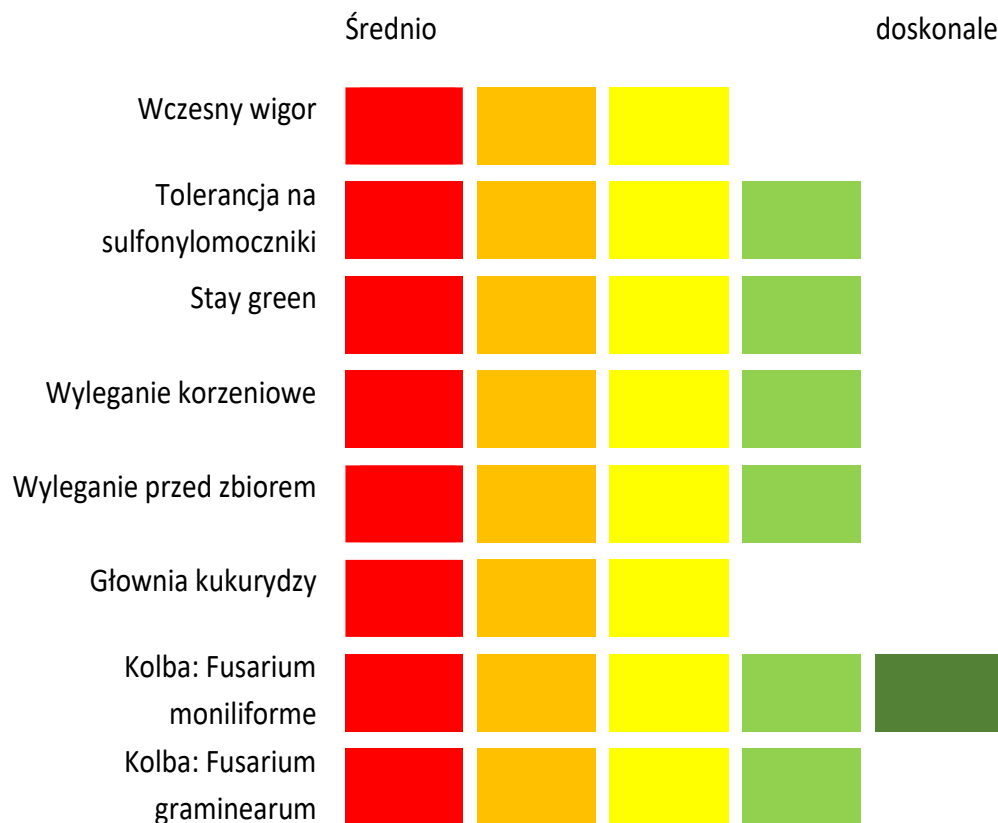
Nośnikami nawozowymi siarki były:

- 1) Siarka elementarna, S⁰ (akronim: S0): Nawóz stały w postaci granuli. Zawiera 90% siarki (S). Nawóz ten może być stosowany w nawożeniu roślin (*karta charakterystyki nawozu*).
- 2) AgroSulca (akronim S-Ca), siarkowo-wapniowy nawóz stały, mączki o strukturze bezpostaciowej. Zawiera 21-23% wapnia (Ca) i 17-18% siarki (S) w formie siarczanowej, rozpuszczalnej w wodzie. Nawóz ten może być stosowany do nawożenia pogłównie lub przedsięwnie o spowolnionym działaniu (*agrosulca.com.pl*).

2.5. Charakterystyka odmiany kukurydzy

ES Cirrus z firmy Euralis jest odmiana wczesną przeznaczaną do uprawy na bioetanol i ziarno. Odmiana ta została zarejestrowana w polskim rejestrze w roku 2012. Liczba FAO dla tej odmiany to 230. *Es Cirrus* wyróżnia się stabilnym plonowaniem w warunkach klimatycznych jakie panują w Polsce. Rośliny nie są podatne na wyleganie, kolby cechują się wysoką odpornością na choroby fuzaryjne. Ziarno tej odmiany szybko dosycha i jest w typie dent. Kolba jest wysoko osadzona. Średnio wytwarza 17 rzędów i średnio 29 ziaren w rzędzie. Roślina średnio osiąga wysokość 305 cm. Odmiana ta wskazana jest do uprawy na stanowiska o niskim potencjale plonowania.

Źródło: (<https://www.euralis.pl/produkty/odmiany-kukurydzy/es-cirrus/>).



Ryc. 2.2. Charakterystyka odmiany *Es Cirrus*. Wykonanie własne na podstawie:

Źródło: <https://www.euralis.pl/produkty/odmiany-kukurydzy/es-cirrus/>

3. Pomiary i oznaczenia

3.1. Pobór próbek glebowych i roślinnych oraz obserwacje polowe

Próbki gleby do oznaczenia podstawowych i agrochemicznych właściwości gleby pobierano przed założeniem doświadczenia w danym sezonie wegetacyjnym. W trakcie sezonu wegetacyjnego próbki gleby do oznaczania zawartość N_{\min} ($N-NH_4$ i $N-NO_3$) pobierano w trzech terminach, stadiach kukurydzy (w skali BBCH): 14, 61 i 89. Materiał glebowy pobierano z trzech kombinacji azotowych: 0, 120 i 160 kg ha⁻¹ dla wszystkich wariantów nawożenia siarką. Próbki gleby pobierano z użyciem świdra spalinowego **Oleo-mac** w czterech jednostkowych punktów na poletku w odległości 10 cm od uprzednio pobranych roślin, z trzech głębokości: 0-30, 30-60 i 60-90 cm. Materiał glebowy umieszczano w workach foliowych, a następnie umieszczono w zamrażarce.

Materiał roślinny do oceny struktury plonu oraz analiz chemicznych pobierano każdorazowo poprzez wycięcie roślin przy powierzchni gleby. Próbki roślinne z pobierano w trzech stadiach rozwojowych kukurydzy:

1. Stadium BBCH 14 (4 rośliny na poletku) – całe rośliny poddano analizie chemicznej oraz pomiarowi biomasy bez podziału na części.
2. Początek kwitnienia, BBCH 61 (4 rośliny) – rośliny rozdzielono na dwie części: liść podkolbowy i pozostała część; każdą frakcję poddano pomiarowi biomasy i analizie chemicznej.
3. Pełna dojrzałość roślin, BBCH 89/90 (6 roślin na poletku) – rośliny rozdzielano na trzy części: i) pęd + liści okrywowe kolby, ii) rdzeń kolby, iii) ziarno; każdą frakcję poddano pomiarowi biomasy i analizie chemicznej.

Termin dawki polowej oznaczono na podstawie wartości wskazanych przez Tensjometr IR-30 umieszczony w glebie.

Pomiary chlorofilometrem (N-tester) wykonywano jednokrotnie w okresie wegetacji w stadium BBCH 61.

Stadium BBCH 14



Stadium BBCH 61



Fot. 2.1. Stadia pobierania próbek roślinnych

Źródło: udostępnienie Witold Grzebisz

3.2. Oznaczenia laboratoryjne gleby

Odczyn gleby określono metodą potencjometryczną (1 M KCl). Do 7 g gleby dodano 20 ml 1,0 M KCl, wytrząsano przez okres 45 minut i odstawiono na 24 godziny. Po upływie określonego czasu mierzono pH gleby

Zawartość przyswajalnych form makroskładników i mikroskładników w glebie P, K, Mg, Ca oznaczono z wykorzystaniem powietrznie suchych próbek gleby metodą Mehlich 3 (Mehlich, 1984). Gleba została wysuszona w temperaturze pokojowej, a następnie ucierana i przesiana przez sita o wymiarach oczek 2 mm. W kolejnych krokach postępowano wg kolejności:

1. Naważono 5 g gleby do plastikowych bidonów;
2. Próby zalewano 50 cm³ roztworu ekstrakcyjnego (0.2N CH₃COOH + 0.25 N NH₄NO₃ + 0.015 N NH₄F + 0.013 N HNO₃ + 0.001 M EDTA). Roztwór powinien mieć pH 2.5 ± 0.1 (Mehlich, 1984);
3. Stosunek gleby do roztworu wynosił 1:10;
4. Zakręcone bidony umieszczono w wytrząsarce na okres 5 minut;
5. Próby przesączono do probówek plastikowych na sączku bibułowym;
6. Oznaczenia koncentracji pierwiastków w przesączu glebowym przeprowadzono z wykorzystaniem metody atomowej spektrometrii absorpcyjnej – ASA (K, Mg, Ca). Koncentrację fosfor w przesączu oznaczano na spektrofotometrze – metoda kolorymetryczna z molibdenianu amonu i kwasu askorbinowego (Specord 2XX/40).

Azot mineralny (N_{\min}) oznaczano w świeżych próbkach gleby *Houba i in., 2000; Barłóg i in., 2017*). Ekstrakcję azotu z gleby przeprowadzono w następujący sposób:

1. Naważono 20 g gleby do plastikowych bidonów;
2. Próby gleby zalewano 200 cm³ 0,01 molowym roztworem CaCl₂, stosunek gleby do roztworu wynosił 1:10;
3. Zakręcone bidony umieszczono w wytrząsarce na okres 1 godziny (mieszadło obrotowe);
4. Próby przesączono do probówek na sączku twardym;
5. Pomiar przeprowadzono na aparacie Flow Injection Analyzer Star 5000 (nastrzykowy kolorymetr przepływowy).

Zawartość siarki siarczanowej w świeżej glebie oznaczono po ekstrakcji roztworem octanu amonu z kwasem octowym (0,5 N roztwór CH₃COONH₄ + 0,25N CH₃COOH) - metoda nefelometryczną (*Lipiński, 2019*).

3.3. Oznaczenia laboratoryjne materiału roślinnego

Analizę zawartości składników mineralnych w poszczególnych częściach kukurydzy przeprowadzono wg metod opisanych poniżej:

1. Metodyka oznaczania azotu ogólnego w materiale roślinnym

Naważono 0,2 g zmielonego materiału roślinnego do kolb o pojemności 250 cm³, następnie dodano katalizator (CuSO₄ + K₂SO₄) oraz 10 cm³ stężonego kwasu siarkowego IV. Przygotowane kolby umieszczono na piecu i mineralizowano w temperaturze 420°C przez około 45 minut. Po zmineralizowaniu prób azot oznaczono metodą Kiejdahla z wykorzystaniem autoanalyzera FOSS Kjeltac 8000 (*PN-EN ISO 20483:2014-02. 2015*).

2. Metodyka oznaczania Zn, Mn, Cu i Fe w materiale roślinnym

Naważono 1,5 g zmielonego materiału roślinnego do porcelanowych parowniczek (tygli), które umieszczono w piecu muflowym. Mineralizację „na sucho” przeprowadzono w temperaturze 620 °C w czasie 8 godzin. Do zmineralizowanego materiału w tyglach dodano 2 cm³ rozcieńczonego kwasu azotowego V HNO₃. Uzyskaną mieszaninę przesączano do probówek, a następnie do przesączu dodano wodę destylowaną, tak aby osiągnąć objętość 15 cm³. Tak przygotowane próbki poddano chemicznej analizie metodą absorpcyjnej spektrometrii atomowej (ASA, Varian).

3. Metodyka oznaczania Mg, K i Ca w materiale roślinnym

Do oznaczeń wykorzystano wcześniej przygotowane próbki do analizy oznaczenia Zn, Mn, Cu oraz Fe. Z próbek ze stężonym roztworem pobrano 1 cm³ analitu, który rozcieńczono przy użyciu wody destylowanej w stosunku 1:10. Magnez oznaczono metodą ASA, a zawartość potasu i wapnia metodą fotopłomieniową aparacie BWB – Flame Photometer.

3.4. Metodyka oznaczania P, C i S w materiale roślinnym

Do oznaczenia zawartości fosforu wykorzystano wcześniej przygotowane próbki analitu. Z próbek ze stężonym roztworem analitu pobrano 0,5 cm³ analizy, następnie dodano 1 cm³ metawanadnianu amonu i uzupełniono do objętości 25 cm³ wodą destylowaną.

Oznaczenie zawartości wykonano z użyciem analizatora ELEMENTRAC-CS.

3.5. Kryteria oceny stanu odżywienia kukurydzy

Zakresy zawartości składników mineralnych w roślinach kukurydzy ziarnie i w roślinie w badanych fazach rozwojowych zamieszczono w załącznikach 5.1, 5.2, 5.4, 5.5.

3.6. Wskaźniki bilansowe i efektywności azotu

W tab. 2.3 zestawiono wskaźniki/indeksy gospodarki azotem, które opracowano z wykorzystaniem wyników podstawowych.

Tabela 2.3. Indeksy gospodarki azotem przed i po kwitnieniu kukurydzy

Indeksy gospodarki azotem w okresie przed kwitnieniem kukurydzy	
1. Masa N w systemie gleba/roślina, BBCH 14	$N_{in14} = N_{min14} + NA_{14}$, kg ha ⁻¹
2. Saldo bilansowe N, BBCH 14 – BBCH 61	$N_{b61} = N_{in14} - NA_{61}$ (kg ha ⁻¹)
3. Netto uruchomiony N, BBCH 14 – BBCH 61	$N_{g65} = N_{min61} - N_{b61}$ (kg ha ⁻¹)
4. Masa N w systemie gleba/roślina, BBCH 61	$N_{in61} = N_{in14} + N_{g61}$ (kg ha ⁻¹)
5. Efektywność akumulacji N w BBCH 14	$EN_{in15} = NA_{61}/N_{in15} \cdot 100\%$
6. Efektywność akumulacji N w BBCH 61	$EN_{in61} = NA_{61}/N_{in61} \cdot 100\%$
Indeksy gospodarki azotem w okresie przed kwitnieniem kukurydzy	
7. Saldo bilansowe N, BBCH 61 – BBCH 89	$N_{b89} = N_{in61} - NA_{89}$ (kg ha ⁻¹)
8. Netto uruchomiony azot, BBCH 61 – BBCH 89	$N_{g89} = N_{min89} - N_{b89}$
9. Masa N w systemie gleba/roślina, BBCH 89	$N_{in89} = N_{in61} + N_{g89}$
10. Całkowita efektywność akumulacji N dla N_{in61}	$ETN_{in61} = NA_{89}/N_{in61} \cdot 100\%$
11. Całkowita efektywność akumulacji N dla N_{in89}	$ETN_{in89} = NA_{89}/N_{in89} \cdot 100\%$
12. Efektywność akumulacji N w ziarnie dla N_{in61}	$EN_{gr61} = NA_{gr}/N_{in61} \cdot 100\%$
13. Efektywność akumulacji N w ziarnie dla N_{in89}	$EN_{gr89} = NA_{gr}/N_{in89} \cdot 100\%$
14. Indeks żniwny N	$IN = (NA_{gr}/NAc) \cdot 100\%$
15. Akumulacja jednostkowa N	$AJN = NAc/PLZ$, kg N t ⁻¹
16. Produktywność jednostkowa N	$PJN = (PLZ \cdot 1000)/NAc$, kg ziarna kg ⁻¹ N

Legenda:

NA – masa azotu w biomase kukurydzy w stadium BBCH 14, 61, 89,

$N_{min14, 61, 89}$ – masa N_{min} w BBCH 14, 61 i 89;

$NA_{14, 61, 89}$ - masa N zawarta w kukurydzy w BBCH 14, 61, 89.

NA_{gr} - masa azotu w ziarnie, kg N ha⁻¹,

NAc – całkowita masa N w kukurydzy w stadium BBCH 89, kg N ha⁻¹,

PLZ – plon ziarna, t lub kg ha⁻¹.

3.7. Obliczenia statystyczne

Uzyskane wyniki poddano analizie wariancji dla doświadczeń czynnikowych w programie Statistica 13®. Różnice między poziomami czynników doświadczalnych określono na podstawie testu post-hoc Tuckey'a. Analizę regresji krokowej wykonano w pakiecie Statistica 13®. Do wykonania obliczeń, korelacji prostej i tworzenia macierzy korelacji wykorzystano program Microsoft Excel.

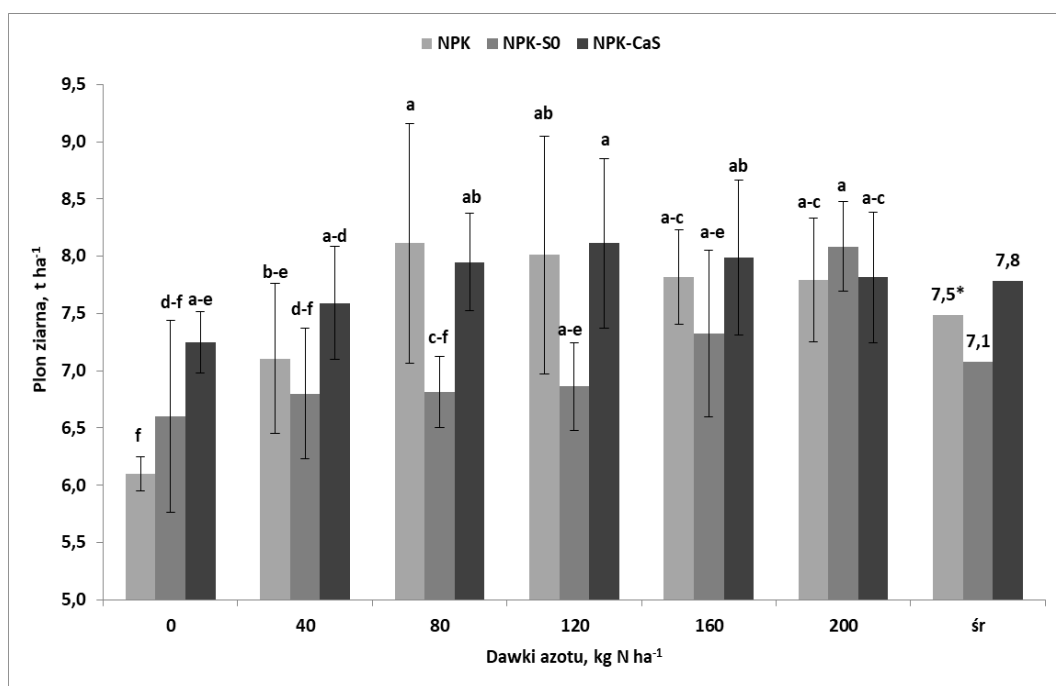
4. Wyniki badań

4.1. Plon i struktura plonu ziarna

4.1a. Doświadczenie nienawadniane

Plon ziarna kukurydzy, a także większość elementów struktury plonu wykazała istotną zależność od współdziałania Lata \times SYS \times ND. Wilgotność ziarna (WI) zależała od SYS \times ND, a obsada roślin (OB) tylko od Lat (zał. 4.1a). Współczynnik zmienności (WZ) dla plonu wyniósł 14,3%, co tym samym wskazuje na małą zmienność omawianej cechy w latach badań. Wartości WZ dla WI, OB i liczby rzędów w kolbie (R) były mniejsze od 10% a dla liczby ziarniaków (LZ) i masy 1000 ziarniaków (MTZ) były mniejsze od 15%. Ta wartość graniczna WZ została, lecz tylko nieznacznie przekroczona dla liczby ziarniaków w rzędzie (LZR) i liczby ziarniaków w kolbie (LZK) (tab. 4.1).

Analizę plonów przedstawiono do współdziałania SYS \times ND a zmienność, wynikająca z działania Lat, określono za pomocą standardowego błędu średniej (ryc. 4.1).



Ryc. 4.1. Wpływ systemów nawożenia siarką i dawek azotu na plon ziarna – doświadczenie nienawadniane.

Źródło: opracowanie własne. ^ate same oznaczenia literowe oznaczają brak istotnych różnic między kolumnami; pionowy słupek w kolumnie określa wielkość standardowego błędu średniej. *średnia dla systemów nawożenia siarką.

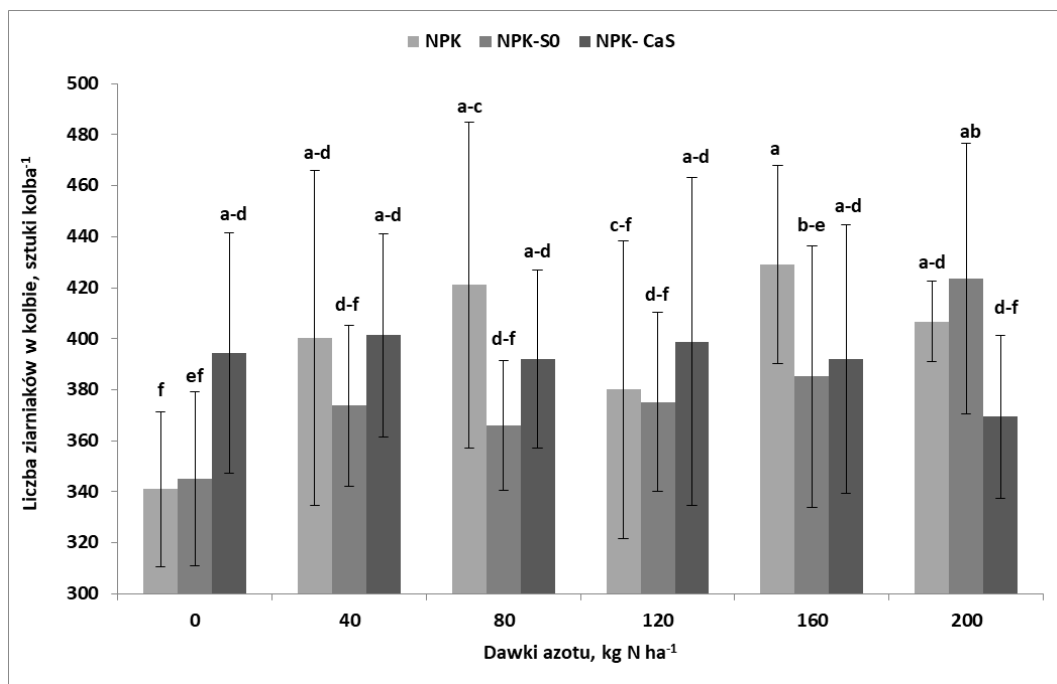
Wpływ systemów nawożenia siarką (SYS) na plon ziarna, niezależnie od testowanej formy (siarka elementarna – S₀ i siarczan wapnia CaSO₄ × 2H₂O → CaS), ujawniał się na każdej kombinacji z N. W pierwszym etapie analizy trendu plonu w reakcji na wzrastające dawki azotu określono reakcję plonu ziarna kukurydzy na działanie S na kontroli N, czyli na kombinacji bez zastosowanego azotu (N-0). Plon na obiekcie NPK-S₀ w stosunku do NPK zwiększył się o 8,1%, a na obiekcie NPK-CaS odnotowano wzrost o 18%. Wpływ wzrastających dawek azotu na plon zależał od systemów nawożenia siarką (ryc. Z4.1). Na obiekcie NPK realny plon ziarna wzrastał do dawki 80 kg N ha⁻¹ i wyniósł 8,01 t ha⁻¹. Natomiast teoretyczny, największy plon (PLZ_{max}) na poziomie 8,19 t ha⁻¹ odnotowano dla optymalnej dawki (N_{opt}), wynoszącej 136 kg N ha⁻¹. Na obiekcie NPK-S₀ plony ziarna wykazywały niewielki wzrost w stosunku do kontroli N, aż do dawki 120 kg N ha⁻¹. Istotny wzrost odnotowano dopiero na kombinacji 160 kg N ha⁻¹, a zwłaszcza 200 kg N ha⁻¹, dla której plon ziarna wyniósł 8,10 t ha⁻¹. Na obiekcie NPK-CaS plony ziarna istotnie wzrastały osiągając maksymalną wartość 8,10 t ha⁻¹ na kombinacji 120 kg N ha⁻¹. Większe dawki N prowadziły do nieistotnego spadku plonu. Teoretyczny plon na tym obiekcie wyniósł 8,10 t ha⁻¹ dla N_{opt} = 130 kg N ha⁻¹. Należy podkreślić, że na tym obiekcie większe plony od NPK odnotowano także dla dawki 40 kg N ha⁻¹.

Wartości współczynnika zmienności (WZ) dla SYS na tle dawek N kształtowały się na niskim poziomie. Największą zmienność odnotowano na kombinacjach nawożonych 80 i 120 kg N ha⁻¹ a znacznie mniejszą na kombinacjach z największymi dawkami N. Wartość WZ dla dawek N na tle SYS była największa na NPK (WZ = 10,2%) a znacznie mniejsza na obiektach z siarką. Wartość WZ dla NPK-CaS wyniosła tylko 4,1 %, co wskazuje na stabilność plonów w latach na tym obiekcie.

Ocenę struktury plonu ziarna przeprowadzono dla sześciu cech, w tym czterech podstawowych, a dwóch zagregowanych (tabela 4.1). Z analizy regresji krokowej wynika że plon ziarna (PLZ) istotnie kształtowała liczba ziarniaków w kolbie (LZK), co przedstawia poniższe równanie:

$$PLZ = 3,039 + 0,11LZK \text{ dla } n = 54, R^2 = 0,53, p \leq 0,01$$

Uzyskane równanie informuje, że plon ziarna w 53% kształtowała zmienność LZK. Cecha ta wykazywała współdziałanie Lat z czynnikami doświadczalnymi (ryc. 4.2).



Ryc. 4.2. Wpływ systemów nawożenia siarką i dawek azotu na liczbę ziarniaków w kolbie – doświadczenie nienawadniane.

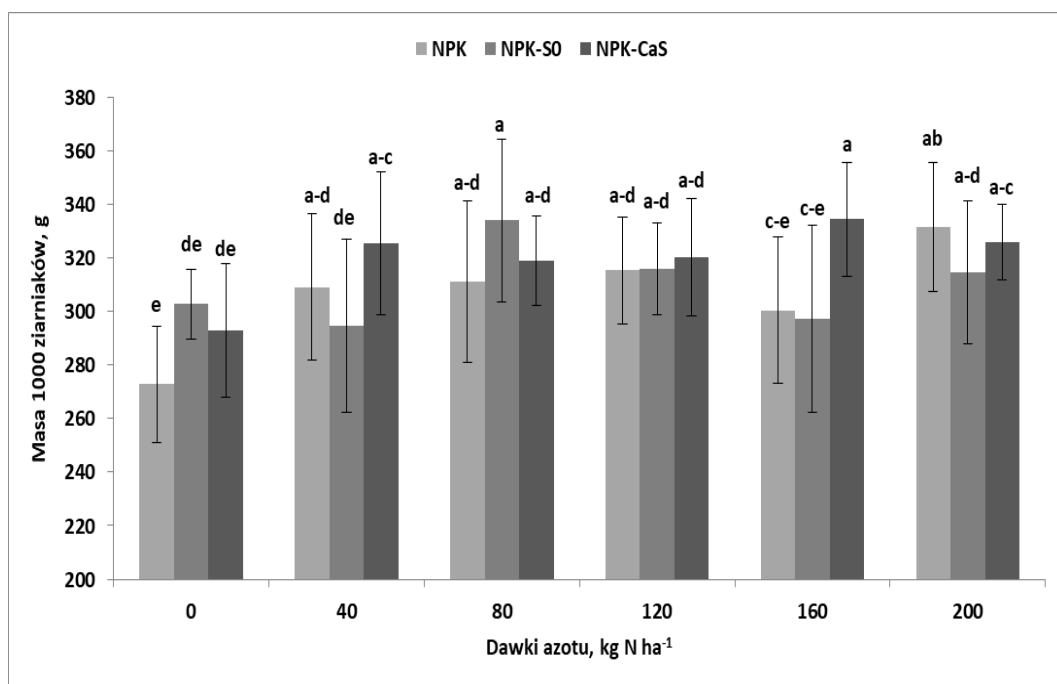
Źródło: opracowanie własne. ^ate same oznaczenia literowe oznaczają brak istotnych różnic między kolumnami; pionowy słupek w kolumnie określa wielkość standardowego błęd średniej.

Na kontroli N istotnie większe wartości LZK, wynoszące 394, odnotowano na obiekcie NPK-CaS w porównaniu do NPK i NPK-S₀. Na tym ostatnim obiekcie nie stwierdzono wzrostu LZK wraz ze wzrostem dawki N. Zaznaczył się natomiast trend spadkowy, lecz nieistotny w miarę wzrostu dawek N (ryc. Z4.2). Na obiekcie NPK, cecha ta wykazała przebieg zgodny z modelem funkcji kwadratowej. Odnotowano wzrost LZK następował aż do dawki 80–160 kg N ha⁻¹. Spadek LZK na kombinacji 120 kg N ha⁻¹ był wynikiem działania czynnika losowego. Maksymalna wartość LZK, uwzględniając wszystkie kombinacje N, wyniosła 438 sztuki dla $N_{opt} = 126,7$ kg N ha⁻¹. Pomijając kombinację 120 kg N ha⁻¹ wartość tej cechy wyniosłaby 442 szt. kolba⁻¹ przy dawce 127 kg N ha⁻¹. Na obiekcie S₀ wartości LZK wzrastały wraz z dawkami N osiągając największą wartość na kombinacji 200 kg N ha⁻¹.

Wartość wskaźnika WZ rozpatrywana dla SYS na tle dawek N była bardzo mała, włącznie do kombinacji 40 kg N ha⁻¹. Poczynawszy od kombinacji 80 kg N ha⁻¹, odnotowano wielokrotny wzrost wartości WZ, która na kombinacji z 200 kg N ha⁻¹, wyniosła aż 49,5%. Wartość WZ dla dawek N dla NPK-CaSO₄ wyniosła 2,9% i była ponad 2,5-krotnie mniejsza od NPK (WZ = 8,1%). LZK jako cecha określająca plon ziarna była dodatnio skorelowana z liczbą ziarniaków w rzędzie (LZR, $r = 0,97^{***}$) i

liczbą rzędów (R), masą 1000 ziarniaków (MTZ) a ujemnie z obsadą roślin (OB). Korelacja z liczbą ziarniaków na m² (LZ, r = 0,61^{***}) była istotna, lecz niska (tab. 4.1b).

MTZ, pomimo, że odnotowano istotny, lecz nie determinujący wpływ na plon ziarna, jest drugim poza LZ, kluczowym elementem struktury plonu. MTZ wykazało istotny, lecz mniejszy niż LZK związek z plonem ziarna (tab. 4.1b). Cecha ta nie wykazała związku korelacyjnego tylko z R. Największą MTZ odnotowana w 2022 roku, a istotnie mniejszą w pozostałych latach. Cecha ta wykazała istotną zmienność w reakcji na współdziałanie Lata × SYS × ND, lecz WZ nie przekroczył 15% (12,4%) (ryc. 4.3 i tab. 4.1).



Ryc. 4.3. Wpływ systemów nawożenia siarką i dawek azotu na masę 1000 ziarniaków – doświadczenie nienawadniane.

Źródło: opracowanie własne. ^ate same oznaczenia literowe oznaczają brak istotnych różnic między kolumnami; pionowy słupek w kolumnie określa wielkość standardowego błędu średniej.

Reakcja MTZ na wzrastające dawki azotu była zmienna, zależnie od SYS. Wartość tej cechy na kontroli N była istotnie większa na obiekcie NPK-S0 w stosunku do NPK. Na tym obiekcie największy wzrost MTZ w stosunku do N0 odnotowano na kombinacji 40 kg N ha⁻¹ a dalszy, istotny wzrost ujawnił się dopiero na kombinacji 200 kg N ha⁻¹. Tym samym trend zmienności MTZ najlepiej opisuje funkcja liniowa, gdyż wraz ze wzrostem dawki N, masa ziarniaków wzrastała, osiągając największą wartość na kombinacji 200 kg N ha⁻¹ (ryc. Z4.3). Przyrost w stosunku do N0 wyniósł 21%. Każdy kilogram zastosowanego N zwiększał MTZ o 0,19 gr. Przyjmując tą wartość przyrost MTZ w stosunku do kontroli wyniósł 38 gramów o realne 58 gram. Na

obiekcie NPK-S0 z powodu znacznej zmienności pomiędzy kombinacjami azotowymi nie odnotowano istotnego trendu. Największą wartość stwierdzono na kombinacji nawozowej 80 kg N ha⁻¹, a istotnie najmniejszą na kombinacji 40 i 160 kg N ha⁻¹. Na obiekcie NPK-Ca największa wartość MTZ odnotowano na kombinacji 160 kg N ha⁻¹. Jak wynika z równania 2^o maksymalny MTZ wyniósł 329 gram dla dawki 147 kg N ha⁻¹. Wartości wskaźnika WZ dla SYS na tle dawek N dawek azotu były bardzo małe, a największa na kombinacji 160 kg N ha⁻¹ wyniosła 6,6%. Trend WZ dla dawek N w zależności od systemów nawożenia S zmniejszał się w kierunku: NPK (6,3% > NPK-S0 (4,7%) > NPK-CaS (4,4%).

Tabela 4.1. Plon i struktura plonu kukurydzy – doświadczenie nienawadniane.

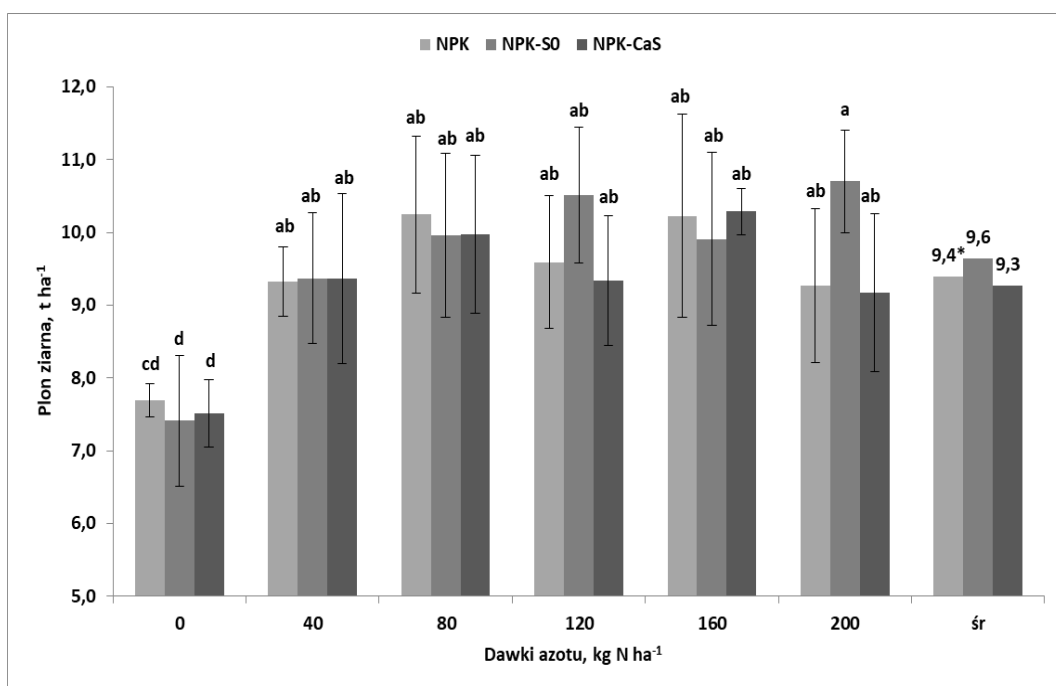
Czynnik	Poziom czynnika	PLZ t ha ⁻¹	OB liczba m ⁻²	R liczba kolba ⁻¹	LZR liczba rząd ⁻¹	LZK liczba kolba ⁻¹	LZ liczba m ⁻²	MTZ g	WI % s,m,
Lata (L)	2020	6,7 ^b	6,3 ^b	14,9 ^b	20,9 ^c	312 ^c	2497 ^b	271 ^c	18,7 ^{ab}
	2021	7,8 ^a	5,7 ^c	15,6 ^a	28,9 ^a	451 ^a	2559 ^b	317 ^b	19,0 ^a
	2022	7,9 ^a	6,9 ^a	15,0 ^b	26,9 ^b	403 ^b	2778 ^a	348 ^a	18,5 ^b
F _{ob, p}		69,5 ^{***}	211,4 ^{***}	21,3 ^{***}	487 ^{***}	400,1 ^{***}	33,7 ^{***}	254,3 ^{***}	4,8 ^{**}
Systemy nawożenia siarka (SYS)	NPK	7,5 ^b	6,3	15,0	26,2 ^a	396 ^a	2667 ^a	307 ^b	18,7 ^b
	NPK-S0	7,1 ^c	6,2	15,2	24,9 ^c	378 ^b	2531 ^b	310 ^b	18,6 ^b
	NPK-CaSO ₄	7,8 ^a	6,3	15,3	25,6 ^b	391 ^a	2635 ^a	320 ^a	19,0 ^a
F _{ob, p}		19,6 ^{***}	1,5 ^{ns}	2,6 ^{ns}	11,92 ^{***}	7,16 ^{**}	7,8 ^{***}	7,7 ^{***}	5,4 ^{**}
Dawki azotu (ND) kg N ha ⁻¹	0	6,6 ^c	6,3	14,8 ^c	24,3 ^b	360 ^b	2433 ^c	290 ^c	18,7 ^b
	40	7,2 ^b	6,3	15,4 ^a	25,3 ^{ab}	392 ^a	2644 ^{ab}	310 ^b	18,5 ^{ab}
	80	7,6 ^a	6,3	15,0 ^b ^c	26,1 ^a	393 ^a	2662 ^{ab}	321 ^{ab}	18,6 ^{ab}
	120	7,7 ^a	6,2	15,0 ^a ^c	25,4 ^a	385 ^a	2539 ^{bc}	317 ^{ab}	18,9 ^{ab}
	160	7,7 ^a	6,3	15,3 ^{ab}	26,2 ^a	402 ^a	2701 ^a	311 ^{ab}	18,6 ^{ab}
	200	7,9 ^a	6,3	15,4 ^{ab}	26,0 ^a	400 ^a	2688 ^{ab}	324 ^a	19,1 ^a
F _{ob, p}		16,7 ^{***}	1,1 ^{ns}	5,5 ^{***}	7,7 ^{***}	9,41 ^{***}	8,43 ^{***}	13,0 ^{***}	2,7 [*]
Opis statystyczny									
Średnia		7,5	6,3	15,2	25,5	388,6	2611,1	312,1	18,7
Odchylenie standardowe		1,1	0,5	0,7	4,0	69,0	269,2	38,7	0,5
Współczynnik zmienności, WZ, %		14,3	8,3	4,5	15,5	17,8	10,3	12,4	2,9

Źródło: opracowanie własne.***, **, * – istotność na poziomie 0,001; 0,01; 0,05; ns – brak istotnego działania czynnika; ^a – ta sama litera w rzędzie oznacza brak istotnego zróżnicowania cechy w kolumnie dla danego czynnika. Legenda: PLZ – plon; OB – obsada roślin; R – liczba rzędów w kolbie; LZR – liczba ziarniaków w rzędzie; LZK – liczba ziarniaków w kolbie; LZ – liczba ziarniaków na m²; MTZ – masa 1000 ziarniaków; WI – wilgotność ziarna.

4.1b. Doświadczenie nawadniane

Plon ziarna kukurydzy istotnie zależał od współdziałania Lata \times SYS \times ND. Ten poziom zależności odnotowano także dla R, LZK i MTZ. Liczba ziarniaków w rzędzie (LZR) wykazała zależność od Lata \times ND, a LZ od Lat \times SYS (zał.4.2a). Współczynnik zmienności (WZ) dla plonu ziarna wyniósł 17,5%, co oznacza zmienność na średnim poziomie. Wartości WZ poniżej 15% (zmienność mała) odnotowano dla wszystkich elementów struktury plonu. Najmniejsze wartości, wynoszące 3,6% i 4,4% stwierdzono dla WI i R, a nieco większą, wynoszącą 6,7% dla LZR.

Dla większości kombinacji azotowych nie odnotowano różnic między obiektem NPK, a obiektami, gdzie została zastosowana siarka (ryc. 4.4).



Ryc. 4.4. Wpływ systemów nawożenia siarką i dawek azotu na plony ziarna – doświadczenie nawadniane.

Źródło: opracowanie własne. *te same oznaczenia literowe oznaczają brak istotnych różnic między kolumnami; pionowy słupek w kolumnie określa wielkość standardowego błędu średniej; średnia dla systemów nawożenia siarką.

Znaczne różnice, aczkolwiek nieistotne, odnotowano na kombinacji 120 N ha⁻¹, gdzie plon ziarna na obiekcie NPK-S0 był większy o 9,3 % w porównaniu do NPK. Ten trend ujawnił się także na kombinacji 200 N ha⁻¹. Wzrost plonu w stosunku do NPK wyniósł 15%. Na obiekcie NPK-CaS nie odnotowano znaczących różnic w plonie ziarna w porównaniu do NPK. Jednakże, trendy plonów ziarna na tle wzrastających dawek azotu przebiegały zgodnie z modelem funkcji kwadratowej (ryc. Z4.4). Na obiektach NPK i NPK-CaS plony wzrastały do dawki 80 N ha⁻¹. Maksymalny plon

ziarna na obiekcie NPK wyniósł 10,1 t ha⁻¹ i został uzyskany dla dawki 118,8 kg N ha⁻¹. Na obiekcie NPK-CaS wartości te kształtowały się jak 10,0 t ha⁻¹ i 123,3 kg N ha⁻¹. Na obiekcie NPK-S0 wartości kardynalne dla uzyskanego modelu wyniosły 10,5 t ha⁻¹ i 154,2 kg N ha⁻¹. Zmienność plonu ziarna (WZ) dla SYS na tle dawek N była najbardziej stabilna na kombinacji nawożonej 40 kg N ha⁻¹ (0,3%). Najbardziej labilny stan, lecz wciąż niski odnotowania na kombinacji nawożonej 200 kg N ha⁻¹ (8,8%). Wartości WZ dla dawek N na tle SYS, były małe i kształtowały się w zakresie 10-12%.

Plon ziarna wyznaczony na podstawie regresji krokowej był funkcją trzech składowych, obsady (OB), wskaźnik zagregowanego, jakim jest liczba ziarniaków (LZ) i masy 1000 ziarniaków (MTZ). Uzyskaną zależność przedstawia równanie:

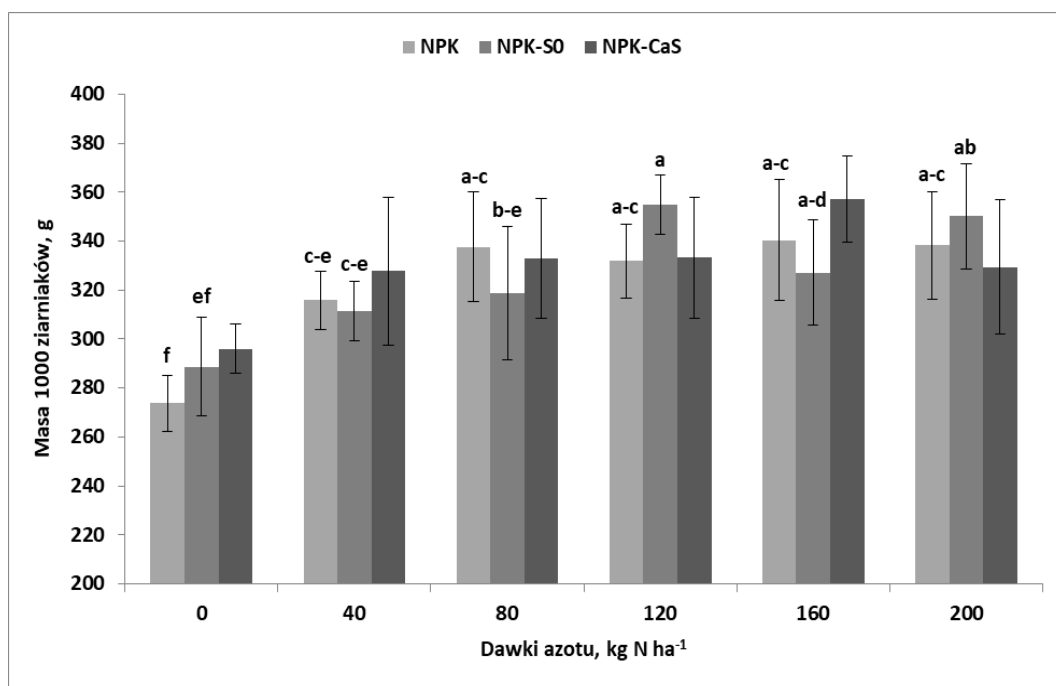
$$PLZ = -9,64 + 0,19OB + 0,02LZ + 0,018MTZ \text{ dla } n = 54, R^2 = 0,99, p \leq 0,001$$

Plon ziarna obliczono także tylko dla MTZ (czynnik o największej wartości współczynnika korelacji ($r = 0,90^{***}$). Uzyskany model liniowy przedstawia się następująco:

$$PLZ = 0,041MTZ - 3,78 \text{ dla } n = 54, R^2 = 0,82, p \leq 0,001$$

Z równania tego wynika, że cecha plonu, jakim jest MTZ wyjaśnia 82% zmienności plonu ziarna kukurydzy w doświadczeniu nawadnianym. Pozostałe elementy struktury plonu wyjaśniły dodatkowo tylko 17% zmienności plonu. MTZ była istotnie skorelowana z obu tymi cechami (tab. 4.2b). Wartości MTZ na obiektach z siarką nie wykazywały stabilnego trendu na wzrastające dawki azotu, aczkolwiek dodatni trend ujawnił się na kontroli N (ryc. 4.5). Największą, średnią wartość MTZ w porównaniu do kontroli azotowej stwierdzono na kombinacji 160 N ha⁻¹. Jednocześnie odnotowano największy, średni wzrost w stosunku do NPK, który wyniósł 19,5%. Masa ziarniaków na obiekcie NPK wzrastała do dawki 80 kg N ha⁻¹. Z uzyskanego modelu funkcji kwadratowej wynika, że największą wartość tej cechy, wynoszącą 344 g otrzymano dla $N_{opt} = 136$ kg N ha⁻¹. Na obiekcie NPK-CaS MTZ wzrastała, pomimo wahań, aż do dawki 160 N ha⁻¹. Jednakże z uzyskanego modelu funkcji kwadratowej wynika, że oba kardynalne wskaźniki były analogiczne, jak dla NPK (ryc. Z4.5). Należy zwrócić uwagę na to, że w zakresie od dawek azotu od 0 kg N ha⁻¹ do N_{opt} , większe wartości omawianej cechy występowały zawsze na obiekcie NPK-CaS. Odmienne trendy omawianej cechy notowano dla NPK-S0. Trend zmian tej cechy najlepiej opisuje model liniowy. Zmienność MTZ dla systemów nawożenia siarką na tle dawek N była

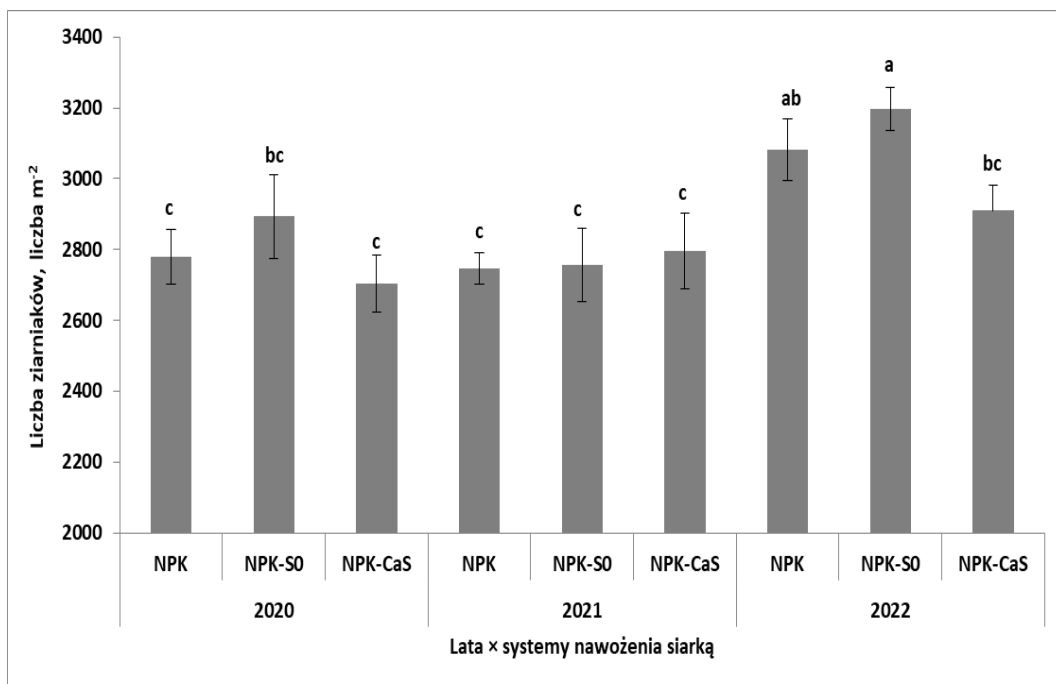
wysoco stabilna, mieszcząc się w zakresie 2,6 – 4,4%). Większe wahania wskaźnika wynikały z działania wzrastających dawek azotu w poszczególnych systemach z siarką. Wartości te były małe i zmniejszały się w kierunku: NPK (8%) ≥ NPK-S0 (7,6%) > NPK-CaS (5,9%).



Ryc. 4.5. Wpływ systemów nawożenia siarką i dawek azotu na masę 1000 ziarniaków – doświadczenie nawadniane.

Źródło: opracowanie własne. ^ate same oznaczenia literowe oznaczają brak istotnych różnic między kolumnami; pionowy słupek w kolumnie określa wielkość standardowego błędu średniej.

Drugą składową głównego równania plonu ziarna była obsada. Cecha ta wykazała zmienność tylko w latach badań (tab. 4.2). Wartości tej cechy były ogólnie małe i wzrastały w kierunku: 2021 < 2020 < 2022. Kolejną składową głównego równania plonu jest liczba ziarniaków (LZ). Cecha ta była istotnie skorelowana z plonem, lecz nie była głównym determinantem. LZ wykazała największą zależność od współdziałania Lata × SYS (zał. 4.2a). Największe wartości LZ odnotowano w 2022 roku (ryc. 4.6). Rok 2021 cechował się największą stabilnością tej cechy, aczkolwiek wartości były najmniejsze. Największe wartości LZ w latach 2020 i 2012 stwierdzono na obiekcie NPK-S0. Największą różnicę, wynoszącą 9,8% między NPK-CaS a NPK-S0 odnotowano w 2022.



Ryc. 4.6. Wpływ współdziałania lat i systemów nawożenia siarką na liczbę ziarniaków w łanie kukurydzy – doświadczenie nawadniane

Źródło: opracowanie własne. ^ate same oznaczenia literowe oznaczają brak istotnych różnic między kolumnami; pionowy słupek w kolumnie określa wielkość standardowego błędu średniej.

Tabela 4.2. Plon i struktura plonu kukurydzy – doświadczenie nawadniane.

Czynnik	Poziom czynnika	PLZ t ha ⁻¹	OB liczba m ⁻²	R liczba kolba 1	LZR liczba rząd 1	LZK liczba kolba 1	LZ liczba m ⁻²	MTZ g	WI % s.m.
Lata (L)	2020	8,5 ^b	6,5 ^b	15,7 ^a	27,4 ^b	433 ^b	2792 ^b	303 ^c	19,2 ^b
	2021	8,7 ^b	5,8 ^c	15,7 ^a	30,4 ^a	478 ^a	2766 ^b	317 ^b	19,6 ^a
	2022	11,1 ^a	7,1 ^a	15,3 ^b	28,1 ^b	429 ^b	3063 ^a	358 ^a	18,8 ^c
F _{ob, p}		126,3***	333,3***	15,4***	47,6***	42,8***	27,8***	108,3***	17,5***
Systemy nawożenia siarka (SYS)	NPK NPK-S0 NPK-CaSO ₄	9,4 9,6 9,3	6,4 6,5 6,4	15,6 15,6 15,5	28,7 29,0 28,3	447 ^{ab} 454 ^a 439 ^b	2870 ^{ab} 2949 ^a 2804 ^b	323 325 329	19,1 ^b 18,9 ^b 19,5 ^a
F _{ob, p}		2,30 ^{ns}	1,4 ^{ns}	1,0 ^{ns}	2,5 ^{ns}	3,2*	5,5**	1,4 ^{ns}	7,8**
Dawki azotu (ND) kg N ha ⁻¹	0	7,5 ^c	6,6	14,5 ^c	27,2 ^b	396 ^b	2589 ^c	286 ^c	18,7 ^b
	40	9,4 ^b	6,5	15,9 ^{ab}	28,7 ^a	455 ^a	2934 ^{ab}	318 ^b	18,7 ^b
	80	10,1 ^{ab}	6,5	16,0 ^a	29,4 ^a	469 ^a	3037 ^a	330 ^{ab}	19,1 ^{ab}
	120	9,8 ^{ab}	6,4	15,5 ^b	28,9 ^a	449 ^a	2878 ^{ab}	340 ^a	19, ^{5a}
	160	10,1 ^a	6,5	15,8 ^{ab}	29,0 ^a	459 ^a	2958 ^{ab}	342 ^a	19,6 ^a
	200	9,7 ^{ab}	6,4	15,7 ^{ab}	28,7 ^a	450 ^a	2849 ^b	339 ^a	19,4 ^a
F _{ob, p}		30,1***	1,6 ^{ns}	31,5***	5,2***	19,1***	12,3***	30,2***	8,8***
Opis statystyczny									
Średnia		9,4	6,5	15,6	28,7	446	2874	326	19,2
Odchylenie standardowe		1,7	0,6	0,7	1,9	40,4	250,9	36,7	0,7
Współczynnik zmienności, WZ, %		17,5	8,8	4,4	6,7	9,1	8,7	11,3	3,6

Źródło: opracowanie własne.***, **, * – istotność na poziomie 0,001; 0,01; 0,05; ns – brak istotnego działania czynnika; ^a – ta sama litera w rzędzie oznacza brak istotnego zróżnicowania cechy w kolumnie dla danego czynnika. Legenda: PLZ – plon; OB. – obsada roślin; R – liczba rzędów w kolbie; LZR – liczba ziarniaków w rzędzie; LZK – liczba ziarniaków w kolbie; LZ – liczba ziarniaków na m²; MTZ – masa 1000 ziarniaków; WI – wilgotność ziarna.

4.2. Biomasa kukurydzy w sezonie wegetacyjnym

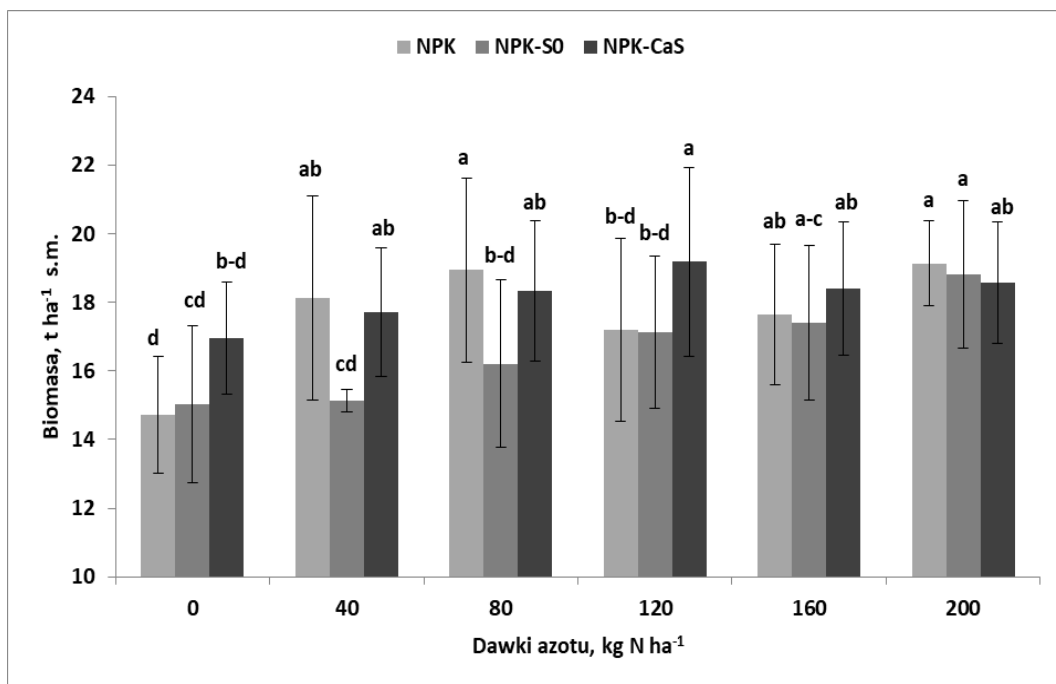
4.2a. Doświadczenie nienawadniane

W okresie wegetacji oznaczono 13 cech podstawowych i zagregowanych oraz indeks żniwny (IŻ) kukurydzy (tab. 4.3). Spośród analizowanego zestawu cech, tylko pięć określonych w stadium dojrzałości fizjologicznej kukurydzy (BBCH 89) wykazało zależność od współdziałania Lata \times SYS \times ND. Reakcję na współdziałanie Lata \times DN wykazała tylko biomasa sucha w stadium BBCH 14 (BM₁₄). Masa świeża kukurydzy w BBCH 14 (MC₁₄), masa świeża i biomasa sucha liścia podkolbowego (odpowiednio MLP₆₁, BLP₆₁) zależały od współdziałania Lata \times SYS (zał. 4.3a). Świeża masa całkowita kukurydzy w stadium BBCH 89 oraz masa kolb i łodyg reagowały na czynniki doświadczalne, lecz nie wykazały współdziałania (zał. 4.3a, tab. 4.3b). Wartości współczynnika zmienności dla 12 cech były małe (< 15%). Dla MC₁₄ i BM₁₄ wskaźnik ten nieznacznie przekroczył 15% (tab. 4.3).

Istotny związek korelacyjny z plonem ziarna odnotowano dla wszystkich badanych cech masy kukurydzy, za wyjątkiem biomasy w stadium BBCH 61, (zał. 4.3b). W stadium 4-tego liścia (BBCH 14) większą zależność odnotowano dla świeżej niż suchej masy roślin w tym stadium (r , 0,53^{***} vs. 0,42^{**}). Nie był to jednak czynnik decydujący o plonie ziarna. Pozostałe cechy określone przed kwitnieniem nie wykazały istotnego związku z plonem, nie były głównymi determinantami plonu ziarna. W okresie po kwitnieniu kukurydzy, istotny związek korelacyjny z plonem odnotowano dla wszystkich badanych cech. W okresie po kwitnieniu, największe zależności korelacyjne stwierdzono dla biomasy całkowitej (BC, sucha masa) ($r = 0.80^{***}$). Wartość wskaźnika WZ dla tej cechy wyniosła 9,3%, czyli była bardzo mała. Otrzymana zależność przedstawia się następująco:

$$PLZ = 0,255BC + 2,98 \text{ dla } n = 54, R^2 = 0,65 \text{ i } p \leq 0,001$$

Z otrzymanego równania wynika, że plon ziarna wzrastał liniowo z wielkością biomasy kukurydzy w stadium BBCH 89. Biomasa kukurydzy (BC) na kontroli azotowej na obiekcie NPK-CaS była istotnie większa (+15,6%) w stosunku do NPK (ryc. 4.7). Prawie taką samą różnicę otrzymano w stosunku do NPK-S0 (+13,3%). Analogiczna prawidłowość, lecz dla większej biomasy, odnotowano na kombinacji 120 kg N ha⁻¹ (11,6% i 12,2%). Na kombinacjach nawożonych 40 i 80 kg N ha⁻¹ istotnie najmniejszą biomasa stwierdzono na obiekcie NPK-S0.



Ryc. 4.7. Wpływ współdziałania systemów nawożenia siarką i dawek azotu na biomasa całkowitą kukurydzy w stadium BBCH 89 – doświadczenie nienawadniane
 Źródło: opracowanie własne. ^ate same oznaczenia literowe oznaczają brak istotnych różnic między kolumnami; pionowy słupek w kolumnie określa wielkość standardowego błęd średniej.

Trendy BC w następstwie dużego zróżnicowania biomasy dla wzrastających dawek N, były odmienne na obiektach z siarką. Na NPK nie stwierdzono istotnego trendu biomasy. Na NPK-S0 biomasa wzrastała liniowo wraz z dawką stosowanego azotu. Należy podkreślić, że BC na tym obiekcie, włącznie do kombinacji 80 kg N ha⁻¹, była istotnie mniejsza od notowanej dla pozostałych obiektów, a na kombinacji 120 kg N ha⁻¹ mniejsza od notowanej na obiekcie NPK-CaS. Natomiast na obiekcie NPK-CaS wzrost BC przebiegał zgodnie z modelem funkcji kwadratowej. Maksymalna BC wyniosła 18,8 t ha⁻¹ i została uzyskana dla $N_{op} = 140,6$ kg N ha⁻¹ (ryc. Z4.6). Różnica w wielkości BC między NPK-CaS a NPK-S0, średnio w zakresie dawek N od 0 do 120 kg N ha⁻¹, kształtowała się na poziomie 2 t ha⁻¹ s.m.. Na kombinacji 40 kg N ha⁻¹ osiągnęła 2,6 t ha⁻¹ s.m.. Natomiast na kombinacji 200 kg N ha⁻¹ ujawnił się niewielki trend spadkowy BC, aczkolwiek różnice były małe (18,8±0,3 t ha⁻¹). Wartości wskaźnika WZ dla SYS na tle dawek N zmniejszały się progresywnie z prawie 10% (9,6%) na kombinacji 40 kg N ha⁻¹ do 1,5% na kombinacji 200 kg N ha⁻¹. Jednocześnie dla dawek azotu zmniejszały się z 9,1% na NPK do 4,2% na NPK-CaS.

Biomasa całkowita kukurydzy w stadium BBCH 89 wykazała istotne związki korelacyjnym ze wszystkimi oznaczanymi cechami kukurydzy, za wyjątkiem świeżej masy całkowitej. Największą wartość współczynnika korelacji odnotowano dla masy

łodyg ($r=0.97^{***}$). Cecha ta, analogicznie, jak biomasa całkowita zależała od współdziałania $Lata \times SYS \times DN$, wykazując podobne trendy (zał. 4.3b).

Indeks żniwny (IŻ) kukurydzy wykazał zależność od współdziałania $Lata \times SYS \times DN$ (tab. 4.3a). Jednak czynnikiem dominującym była Lata. W pierwszych dwóch latach wartości IŻ były niskie, nie przekraczając 41,1% (2020), a w 2022 wartość indeksu osiągnęła 56,5%. Pomimo tego, wartość indeksu WZ była mała (10,2%). IŻ wykazał specyficzną reakcję na czynniki doświadczalne (ryc. Z4.7). Trend reakcji tej cechy na wzrastające dawki azotu na obiekcie NPK opisuje najlepiej funkcja kwadratowa. Maksymalna wartość IŻ, wynosząca 46,4% została uzyskana dla $N_{op} = 172$ kg N ha⁻¹. Na obiekcie NPK-CaS uzyskano ten sam model zmienności, a wartości kardynalne wynosiły 45,4% i 100 kg N ha⁻¹. Natomiast na obiekcie NPK-S0 IŻ nie wykazał udowodnionego trendu. Analizowana cecha wykazała istotną korelację z ośmioma badanymi cechami biomasy kukurydzy. Największą wartość współczynnika korelacji odnotowano dla biomasy liścia podkolbowego (BLP_{61}), która w 74% tłumaczy zmienność IŻ. Zależność IŻ od świeżej masy kukurydzy w stadium BBCH 61 była istotna, lecz ujemna. Dla suchej masy rośliny w tym stadium zależność ta okazała się nieistotna. W stadium BBCH 89 najlepszym predykatorem IŻ była masa rdzenia kolby ($r = 0,7^{***}$) (zał. 4.3b).

Tabela 4.3. Biomasa kukurydzy w krytycznych stadiach formowania plonu – doświadczenie nienawadniane.

Czynnik	Poziom Czynnika	MC ₁₄	BM ₁₄	MC ₆₁	BM ₆₁	MLP ₆₁	BLP ₆₁	MC ₈₉	Mko	Młó	PLZ	PL-Ł	PL-R	BC	IŻ %
Lata (L)	2020	0,8 ^b	0,19 ^c	47,9 ^a	8,1 ^a	1,2 ⁿ	0,28 ^b	29,7 ^c	11,9 ^b	17,8 ^c	5,7 ^c	7,3 ^c	0,9 ^b	13,9 ^c	41,1 ^b
	2021	1,5 ^a	0,44 ^a	42,0 ^b	6,9 ^b	1,1 ^b	0,26 ^c	42,2 ^a	11,5 ^b	30,7 ^a	6,6 ^b	10,9 ^b	0,8 ^b	18,3 ^b	36,3 ^c
	2022	1,4 ^a	0,31 ^b	35,0 ^c	7,6 ^a	1,5 ^a	0,40 ^a	35,5 ^b	13,6 ^a	22,5 ^b	7,6 ^a	11,5 ^a	1,1 ^a	20,3 ^a	56,5 ^a
	F _{ob, p}	61,4 ^{***}	335 ^{***}	121 ^{***}	19,6 ^{***}	328 ^{***}	175 ^{***}	42,9 ^{***}	12,0 ^{***}	104 ^{***}	196 ^{***}	193 ^{***}	36 ^{***}	257 ^{***}	722 ^{***}
Systemy nawożenia	NPK	1,3	0,34 ^a	40,6 ^b	7,39 ^{ab}	1,2 ^b	0,31 ^b	36,5	12,7 ^a	24,0	6,7 ^a	9,9 ^{ab}	1,0 ^a	17,6 ^a	45,5 ^a
	NPK-S ⁰	1,2	0,30 ^b	41,4 ^{ab}	7,36 ^b	1,3 ^a	0,30 ^b	34,2	11,5 ^b	22,6	6,3 ^b	9,4 ^b	0,89 ^b	16,6 ^b	44,4 ^b
	NPK-CaSO ₄	1,2	0,29 ^b	43,0 ^a	7,81 ^a	1,3 ^a	0,33 ^a	36,8	12,7 ^a	24,3	6,9 ^a	10,3 ^{ab}	0,92 ^{ab}	18,2 ^a	44,0 ^b
	F _{ob, p}	0,4 ^{ns}	14,7 ^{***}	4,4 [*]	3,5 [*]	7,9 ^{***}	4,7 [*]	2,2 ^{ns}	4,6 [*]	2,1 ^{ns}	20,1 ^{***}	7,9 ^{***}	3,4 [*]	15,1 ^{***}	3,7 [*]
Dawki azotu (ND)	0	0,9 ^b	0,26 ^b	36,2 ^b	6,6 ^b	1,19 ^b	0,31	31,3 ^b	11,4 ^b	20,3 ^b	6,0 ^b	8,6 ^c	0,9	15,6 ^c	43,4 ^b
	40	1,3 ^a	0,31 ^a	42,9 ^a	7,7 ^a	1,27 ^{ab}	0,31	35,3 ^{ab}	12,2 ^{ab}	23,5 ^{ab}	6,3 ^b	9,7 ^b	1,0	17,0 ^b	43,6 ^{ab}
	80	1,3 ^a	0,32 ^a	42,7 ^a	7,8 ^a	1,29 ^{ab}	0,31	36,9 ^a	12,6 ^{ab}	24,2 ^a	6,8 ^a	10,1 ^{ab}	0,9	17,8 ^a	45,8 ^a
	120	1,3 ^a	0,33 ^a	42,2 ^a	7,7 ^a	1,29 ^{ab}	0,31	35,4 ^{ab}	11,9 ^{ab}	23,0 ^{ab}	6,8 ^a	10,1 ^{ab}	0,9	17,8 ^a	45,4 ^{ab}
	160	1,3 ^a	0,33 ^a	43,2 ^a	7,7 ^a	1,32 ^a	0,32	36,6 ^{ab}	12,4 ^{ab}	24,5 ^a	6,9 ^a	10,0 ^{ab}	0,9	17,8 ^a	45,2 ^{ab}
	200	1,4 ^a	0,33 ^a	42,6 ^a	7,7 ^a	1,29 ^{ab}	0,32	39,4 ^a	13,4 ^a	26,5 ^a	7,0 ^a	10,8 ^a	1,0	18,8 ^a	44,4 ^{ab}
	F _{ob, p}	5,7 ^{***}	7,4 ^{***}	10,3 ^{***}	5,5 ^{***}	2,4 [*]	0,4 ^{ns}	3,8 ^{**}	2,2 ^{ns}	5,1 ^{***}	14,6 ^{***}	9,9 ^{***}	0,5 ^{ns}	14,5 ^{***}	3,2 ^{**}
	Średnia	1,2	0,3	41,6	7,5	1,0	0,3	35,8	12,3	23,7	6,6	9,9	0,9	17,5	44,6
	OSD	0,2	0,1	3,3	0,4	0,1	0,0	3,3	0,7	3,1	0,5	1,1	0,1	1,6	4,6
	WZ, %	15,3	18,5	8,0	5,5	12,9	10,5	9,1	5,8	13,2	7,6	11,2	8,7	9,3	10,2

Źródło: opracowanie własne. ***, **, * – istotność na poziomie 0,001; 0,01; 0,05; ns – brak istotnego działania czynnika; OSD – odchylenie standardowe; WZ, % – współczynnik zmienności; ^a – ta sama litera w rzędzie oznacza brak istotnego zróżnicowania cechy w kolumnie dla danego czynnika; OSD – odchylenie standardowe; WZ – współczynnik zmienności. Legenda: MC₁₄ – masa świeża roślin w stadium BBCH 14; BM₁₄ – sucha masa roślin w stadium BBCH 14; MC₆₁ – świeża masa roślin w stadium BBCH 61; BM₆₁ – sucha masa roślin w stadium BBCH 61; MLP₆₁ – świeża masa liścia podkolbowego w stadium BBCH 61; BLP₆₁ – sucha masa liść podkolbowego w stadium BBCH 61; MC₈₉ – świeża masa roślin w stadium BBCH 89; Mko – świeża masa kolb w BBCH 89; Młó – świeża masa łodyg w BBCH 89; PLZ – plon ziarna; PL-Ł – sucha masa łodyg; PL-R – sucha masa rdzenia; BC – masa sucha całkowita; IŻ – indeks żniwny.

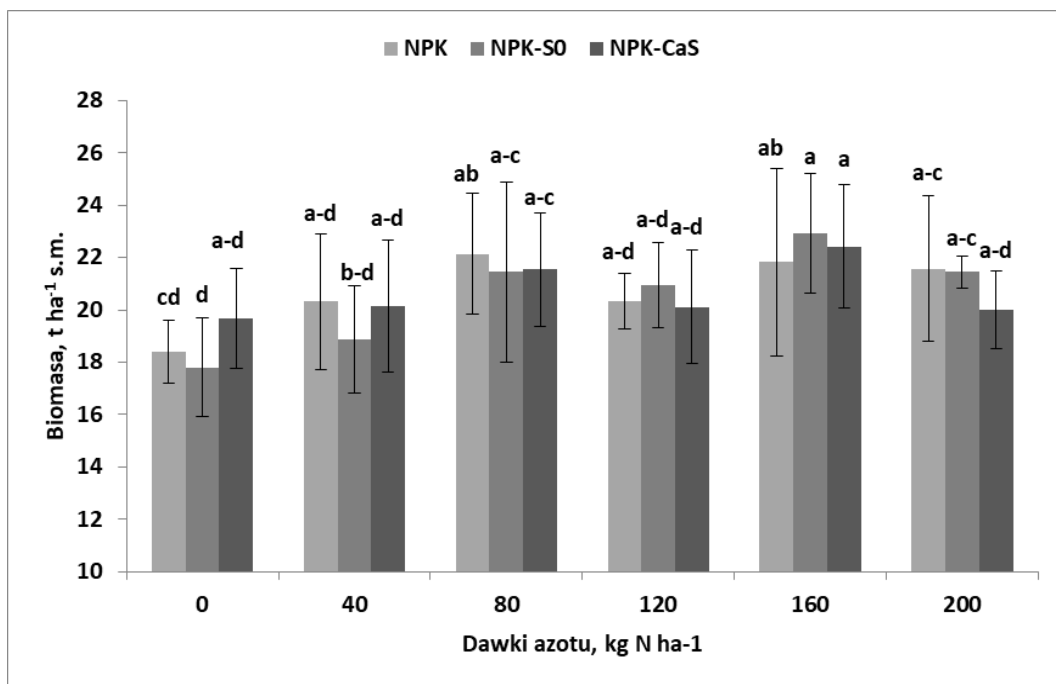
4.2b. Doświadczenie nawadniane

Biomasa kukurydzy w okresie wegetacji w doświadczeniu nawadnianym wykazała bardziej zróżnicowaną reakcję na czynniki doświadczalne. Osiem, spośród 14 badanych cech było zależne od współdziałania $Lata \times SYX \times ND$. Świeża masa kukurydzy w stadium BBCH 61 istotnie zależała tylko od współdziałania $SYX \times ND$ a w stadium BBCH 14 tylko od $Lata \times ND$. Natomiast świeża, jak i sucha masa liścia podkolbowego oraz masa rdzenia kolby reagowały tylko, aczkolwiek zmiennie, na $Lata$ i niektóre czynniki doświadczalne (4.4a). Wartości współczynnika zmienności (WZ) dla biomasy kukurydzy w stadium BBCH 14 przekroczyły 40%. W stadium BBCH 61, tylko dla BM_{61} wskaźnik ten osiągnął prawie 30%, a dla BLP_{61} zbliżył się do 20%. Dla pozostałych cech kształtował się poniżej 15%. Wartości WZ w stadium dojrzałości fizjologicznej ogólnie mieściły się poniżej 20%, a dla PL-R i IŻ kształtowały się na poziomie 10% (tab. 4.4).

Istotny związek korelacyjny z plonem ziarna odnotowano, za wyjątkiem liścia podkolbowego oraz świeżej masy kolb, dla pozostałych cech biomasy (zał. 4.4b). W okresie przed kwitnieniem, największą wartość współczynnika korelacji odnotowano dla BM_{61} ($r = 0,65^{***}$). Cecha ta wyjaśnia zaledwie 42,2% zmienności plonu ziarna. Masa kukurydzy w stadium BBCH 14 wykazała istotny związek korelacyjny z plonem, lecz zależności te były słabsze, niż liścia podkolbowego. W okresie po kwitnieniu, największą wartość współczynnika korelacji otrzymano dla biomasy całkowitej (BC, $r = 0,83^{***}$). Zmienność plonu ziarna w 69% zależała od zmienności BC:

$$PLZ = 0,394BC + 1,29 \text{ dla } n = 54, R^2 = 0,69 \text{ i } p \leq 0,001$$

Otrzymany model liniowy tej zależności jednoznacznie wskazuje, że każdorazowy przyrost biomasy kukurydzy zwiększał plon ziarna. Otrzymana zależność podlegała niewielkiej tylko modyfikacji w wyniku współdziałania czynników doświadczalnych w latach badań (ryc. 4.8).



Ryc. 4.8. Wpływ współdziałania systemów nawożenia siarką i dawek azotu na biomasa całkowitą kukurydzy w stadium BBCH 89 – doświadczenie nawadniane.

Źródło: opracowanie własne. ^ate same oznaczenia literowe oznaczają brak istotnych różnic między kolumnami; pionowy słupek w kolumnie określa wielkość standardowego błęd średniej.

Biomasa całkowita kukurydzy na kontroli N wykazała dodatni trend wzrostu na obiekcie NPK-CaS w stosunku do NPK (+7,1%). Różnica ta była nieco większa w stosunku do NPK-S0 (+10,7%). Trend ten wystąpił jeszcze tylko na kombinacji 40 kg N ha⁻¹. Trend biomasy kukurydzy w reakcji na wzrastające dawki N okazał się zmienny w zależności od systemu nawożenia siarką (ryc. Z4.8). Na obiekcie NPK maksymalną biomasa, wynoszącą 21,6 t ha⁻¹ wyprodukowały rośliny nawożone 142,9 kg N ha⁻¹. Na obiekcie NPK-S0 obie te wartości kardynalne kształtowały się jak 21,9 t ha⁻¹ i 161,8 kg N ha⁻¹. Natomiast na obiekcie NPK-CaS nie uzyskano udowodnionego modelu tej cechy. Wartości wskaźnika WZ dla SYS na tle dawek N były bardzo małe z największą, wynoszącą 5,2% na kontroli N. Natomiast wartości wskaźnika WZ dla dawek N na tle SYS wyniosły 9,2% dla NPK-S0 i tylko 5,2% dla NPK-CaS.

Biomasa kukurydzy w stadium BBCH 90 zależała w znacznym stopniu od biomasy łodyg (r , 0.94***). Dla tej cechy nie odnotowano związku korelacyjnego z świeżą masa lisica podkolbowego (MPL₆₁) i świeżą masa kolb (zał. 4.4b). warto podkreślić to, że świeża masa kukurydzy w stadium BBCH 14 wykazała duży związek z BC, gdyż współczynnik determinacji (R^2) wyniósł 56% dla MC₁₄ i 48% dla BM₄. Z

Indeks żniwny kukurydzy wykazał istotną zależność od współdziałania Lata \times SYS \times DN (zał. 4.4a). Głównym czynnikiem wywołującym zmiany IŻ były lata, lecz

wskaźnik WZ nie przekraczał 10% (tab. 4.4). Wskaźnik ten wykazywał istotną, lecz zmienną reakcję na wzrastające dawki azotu dla poszczególnych systemów nawożenia siarka (ryc. Z4.9). Trend zmian na obiektach NPK i NPK-CaS był zgodny z przebiegiem funkcji kwadratowej. Na obiekcie NPK wartości indeksu osiągnęły wartość maksymalną, wynosząca 40,8%, którą wyznaczała dawka $N_{opt} = 106,3 \text{ kg N ha}^{-1}$. Na obiekcie NPK-CaS wartości kardynalne dla otrzymanego modelu kształtowały się, jak 41,2% i 131 kg N ha^{-1} . Trend IŻ dla obiektu NPK-S0 ogólnie wzrastał z dawką azotu, lecz z powodu zbyt dużych wahań, był nieistotny. Wskaźnik ten wykazał istotny, lecz słaby związek korelacyjny z czterema cechami biomasy. Największy, lecz ujemny związek odnotowano z masą łądyg ($r, -0,52^{***}$).

Tabela 4.4. Biomasa kukurydzy w krytycznych stadiach formowania plonu – doświadczenie nawadniane.

Czynnik	Poziom Czynnika	MC ₁₄	BM ₁₄	MC ₆₁	BM ₆₁	MLP ₆₁	BLP ₆₁	MC ₈₉	Mko	Mło	PLZ	PL-Ł	PL-R	BC	IŻ %
		t ha ⁻¹ s.m.													
Lata (L)	2020	0,84 ^c	0,10 ^c	57,1 ^b	8,9 ^b	1,30 ^a	0,30 ^b	40,6 ^a	18,4 ^a	22,3 ^b	7,2 ^b	8,9 ^c	1,3	17,5 ^c	41,2 ^a
	2021	1,96 ^b	0,22 ^b	48,7 ^c	6,3 ^c	1,04 ^c	0,19 ^c	31,1 ^b	12,1 ^c	19,0 ^c	7,4 ^b	11,4 ^b	1,3	20,1 ^b	37,4 ^b
	2022	2,47 ^a	0,27 ^a	60,6 ^a	12,5 ^a	1,15 ^b	0,24 ^a	42,4 ^a	15,1 ^c	27,3 ^a	9,4 ^a	13,7 ^a	1,3	24,4 ^a	38,7 ^b
F _{ob, p}		312***	269***	78,2***	459***	61,9***	273***	122***	142***	129***	126***	115***	0,3 ^{ns}	152***	22,4***
Systemy nawożenia siarką (SYS)	NPK	1,83	0,21	55,3	9,0	1,14 ^b	0,24	38,6	15,7	22,9	8,0	11,4	1,3	20,8	38,8 ^{ab}
	NPK-S ⁰	1,74	0,20	55,6	9,5	1,16 ^{ab}	0,24	37,4	14,8	22,6	8,2	11,1	1,3	20,6	40,1 ^a
	NPK-CaSO ₄	1,70	0,18	55,6	9,2	1,20 ^a	0,25	38,2	15,1	23,1	7,9	11,5	1,3	20,7	38,4 ^b
F _{ob, p}		2,0 ^{ns}	4,7 [*]	0,1 ^{ns}	2,6 ^{ns}	4,5 [*]	1,4 ^{ns}	1,2 ^{ns}	2,7 ^{ns}	0,5 ^{ns}	2,3 ^{ns}	1,0 ^{ns}	0,6 ^{ns}	0,1 ^{ns}	4,7 [*]
Dawki azotu (ND) kg N ha ⁻¹	0	1,50 ^b	0,18 ^b	48,9 ^c	8,7 ^b	1,08 ^b	0,23 ^b	34,4 ^b	14,1	20,3 ^b	6,4 ^c	11,0 ^b	1,2 ^b	18,6 ^d	34,8 ^b
	40	1,78 ^a	0,20 ^{ab}	53,9 ^b	8,7 ^b	1,15 ^{ab}	0,24 ^a	37,6 ^a	14,6	23,0 ^{ab}	8,0 ^b	10,5 ^b	1,3 ^{ab}	19,8 ^{cd}	40,7 ^a
	80	1,88	0,21 ^a	57,5 ^{ab}	9,5 ^{ab}	1,22 ^a	0,25 ^a	39,1 ^a	15,6	23,5 ^a	8,6 ^a	11,8 ^{ab}	1,4 ^a	21,7 ^{av}	39,8 ^a
	120	1,69 ^{ab}	0,19 ^{ab}	56,4 ^{ab}	9,5 ^{ab}	1,17 ^{ab}	0,24 ^a	37,9 ^a	15,5	22,3 ^{ab}	8,3 ^{ab}	10,8 ^b	1,3 ^{ab}	20,5 ^{bc}	40,9 ^a
	160	1,90 ^a	0,20 ^{ab}	58,3 ^a	9,5 ^{ab}	1,20 ^a	0,25 ^a	39,9 ^a	15,7	24,2 ^a	8,6 ^b	12,4 ^a	1,4 ^a	22,4 ^a	39,0 ^a
	200	1,79 ^a	0,21 ^a	57,9 ^a	9,6 ^a	1,17 ^{ab}	0,25 ^a	39,6 ^a	15,7	23,9 ^a	8,3 ^{ab}	11,5 ^{ab}	1,2 ^{ab}	21,0 ^{ab}	39,4 ^a
F _{ob, p}		4,8***	3,0 [*]	13,3***	4,6***	4,2**	0,6 ^{ns}	4,1**	3,3**	7,7***	30,1***	4,9***	2,8 [*]	11,5***	15,4***
Średnia		1,8	0,2	55,5	9,2	1,2	0,24	38,1	15,2	22,9	8,0	11,3	1,3	20,7	39,1
OSD		0,7	0,1	7,0	2,7	0,1	0,05	6,5	3,0	4,6	1,4	2,4	0,1	3,5	3,9
WZ, %		42,2	41,3	12,6	29,5	11,6	19,2	17,0	19,4	20,3	17,5	21,3	10,5	16,8	9,9

Źródło: opracowanie własne.***, **, * – istotność na poziomie 0,001; 0,01; 0,05; ns – brak istotnego działania czynnika; OSD – odchylenie standardowe; WZ, % – współczynnik zmienności; ^a – ta sama litera w rzędzie oznacza brak istotnego zróżnicowania cechy w kolumnie dla danego czynnika; OSD – odchylenie standardowe; WZ – współczynnik zmienności. Legenda: MC₁₄ – masa świeża roślin w stadium BBCH 14; BM₁₄ – sucha masa roślin w stadium BBCH 14; MC₆₁ – świeża masa roślin w stadium BBCH 61; BM₆₁ – sucha masa roślin w stadium BBCH 61; MLP₆₁ – świeża masa liścia podkolbowego w stadium BBCH 61; BLP₆₁ – sucha masa liść podkolbowego w stadium BBCH 61; MC₈₉ – świeża masa roślin w stadium BBCH 89; Mko – świeża masa kolb w BBCH 89; Mło – świeża masa łodyg w BBCH 89; PLZ – plon ziarna; PL-Ł – sucha masa łodyg; PL-R – sucha masa rdzenia; BC – masa sucha całkowita; IŻ – indeks żniwny.

4.3. Zawartość składników pokarmowych w stadium BBCH 15

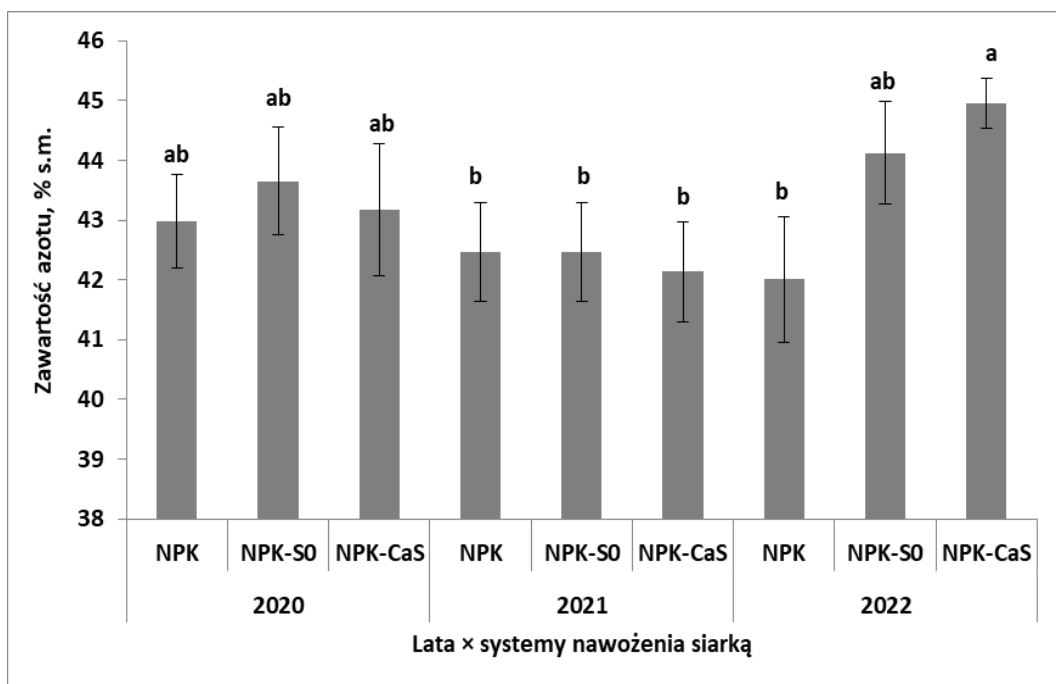
4.3a. Doświadczenie nienawadniane

Spośród 10 analizowanych składników pokarmowych w kukurydzy w stadium BBCH 14, aż sześć (P, Na, Ca, Fe, Mn, Cu) wykazało zależność od współdziałania Lata \times SYS \times ND (tab. 4.5a). Zawartość Mg zależała od współdziałania SYS \times ND, a Zn od Lata \times ND. Natomiast dwa składniki pokarmowe, a mianowicie N i K wykazały zależność od współdziałania Lata \times SYS. Wartości wskaźnika, jakim jest WZ, wahały się od 5% dla N do 47,6% dla Ca. W zakresie średniej zmienności (15-35%) mieściły się P, K, Na, Zn i Cu. Pozostałe pierwiastki przekraczały wartość krytyczną, jaką jest 35% (tab. 4.5). Przeprowadzona analiza regresji krokowej wykazała istotny wpływ N i Mg w stadium BBCH 14 kukurydzy na plon ziarna. Zależność tą przedstawia równanie:

$$PLZ = 0,60 + 0,2N^{**} - 0,001Mg^{***} \text{ dla } n = 54, \quad R^2 = 0,36$$

Siła predykcji plonu na podstawie zawartości N i Mg była istotna, lecz mała. Z otrzymanego równania wynika, że plon ziarna ograniczał niedobór N i jednocześnie nadmiar Mg w omawianym stadium rozwoju kukurydzy. Nie odnotowano istotnego związku zawartości składników pokarmowych z biomasą kukurydzy. Zawartość N w roślinie w stadium BBCH 14 zależała od współdziałania Lata \times SYS (zał. 4.5a). Największą zawartość N w roślinie stwierdzono w 2022 (ryc. 4.9). Zastosowanie siarki zwiększyło istotnie zawartość N. Istotny wzrost w stosunku do NPK, który wyniósł 2,1 g N kg⁻¹ s.m., stwierdzono na obiekcie NPK-S0. Przyrost w stosunku do NPK był jeszcze większy na obiekcie NPK-CaS (+2,9 g kg⁻¹ s.m.). Najmniejszą zawartość składnika odnotowano w 2021, w którym zaznaczył się niewielki, lecz nieudowodniony trend spadkowy na obiektach z siarką. W 2020, zastosowanie siarki elementarnej nieznacznie zwiększyło zawartość N w stosunku do NPK. Zawartość N w roślinie była istotnie i dodatnio skorelowana z zawartością Fe, cynku (Zn), a ujemnie z P (zał. 4.5b). Druga składowa powyższego równania, czyli zawartość Mg wykazała istotną zależność od współdziałania Lata \times ND (ryc. 4.10). Zawartość Mg na kontroli N była istotnie większa na obiektach z siarką w porównaniu do NPK. Prawidłowość ta, lecz w różnym natężeniu utrzymywała się w całym zakresie testowanych dawek N. Należy zaznaczyć, że na kombinacji 200 kg N ha⁻¹, zawartość Mg była mniejsza, niż na kontroli N. Trendy omawianej cechy dla każdego z obiektów z siarką w reakcji na

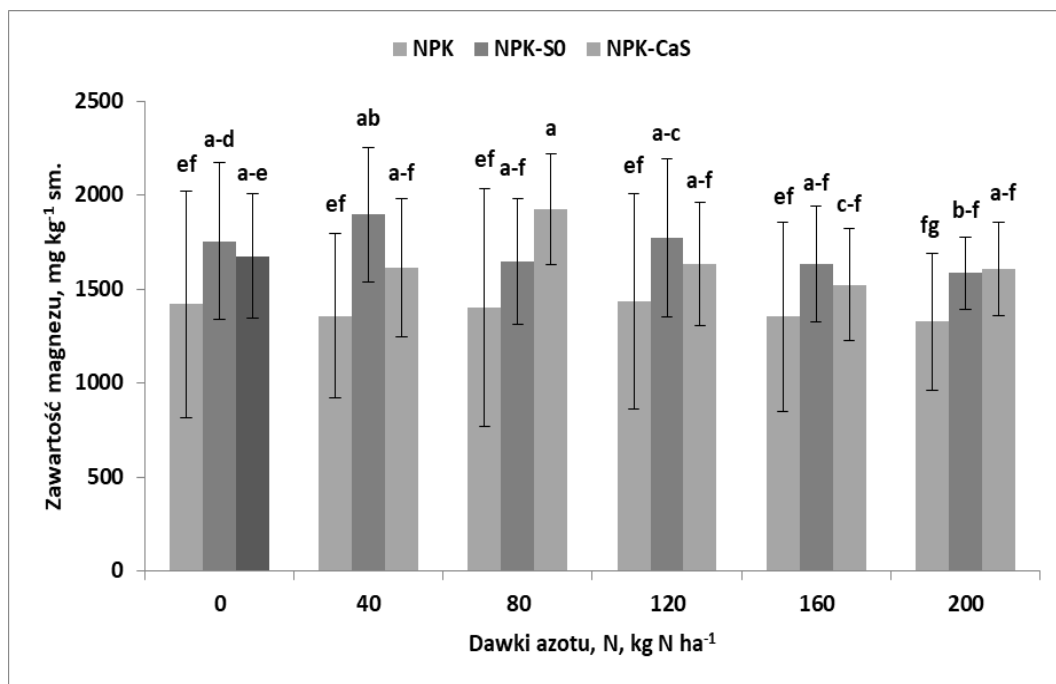
wzrastające dawki azotu, pomimo występującej zmienności, nie zostały udowodnione (ryc. Z4.10).



Ryc. 4.9. Wpływ współdziałania lat i systemów nawożenia siarką na zawartość azotu w kukurydzy w stadium BBCH 14 – doświadczenie nienawadniane.

Źródło: opracowanie własne. ^ate same oznaczenia literowe oznaczają brak istotnych różnic między kolumnami; pionowy słupek w kolumnie określa wielkość standardowego błędu średniej.

Zawartość Mg nie wykazała istotnej korelacji z zawartością N, a także manganem (Mn) i cynkiem (Zn) (zał. 4.5b). Jednocześnie odnotowano, za wyjątkiem Na i Fe, ujemne związki korelacyjne z większością pierwiastków. Największa ujemną zależność odnotowano dla wapnia ($r = -0,63^{***}$). Wartości wskaźnika WZ dla SYS na tle dawek N były bardzo zmienne. Na kontroli azotowej i dla największych dawek azotu wahały się wokół 10%. Natomiast na kombinacjach z 40 i 80 kg N ha⁻¹ nieznacznie przekroczyły 15%. Wartości wskaźnika WZ dla dawek N na tle SYS były bardzo małe. Niezbilansowanie zawartości Mg wzrastało w kierunku: NPK (3,1%) < NPK-S0 (6,7%) < NPK-CaS (8,3%). Zawartość Mg w kukurydzy poza ujemnym związkiem korelacyjnym z plonem wykazała także silny, ujemny związek z biomasą kukurydzy w stadium BBCH 14 (BM₁₄) (zał. 4.5b). Analiza zawartości składników pokarmowych wykazała istotny wpływ siedmiu z 10 pierwiastków na tą cechę (zał. 4.5b). Nie odnotowano udowodnionych zależności dla N, Mn i Zn.



Ryc. 4.10. Wpływ współdziałania systemów nawożenia siarką i dawek azotu na zawartość magnezu w kukurydzy w stadium BBCH 14 – doświadczenie nienawadniane.

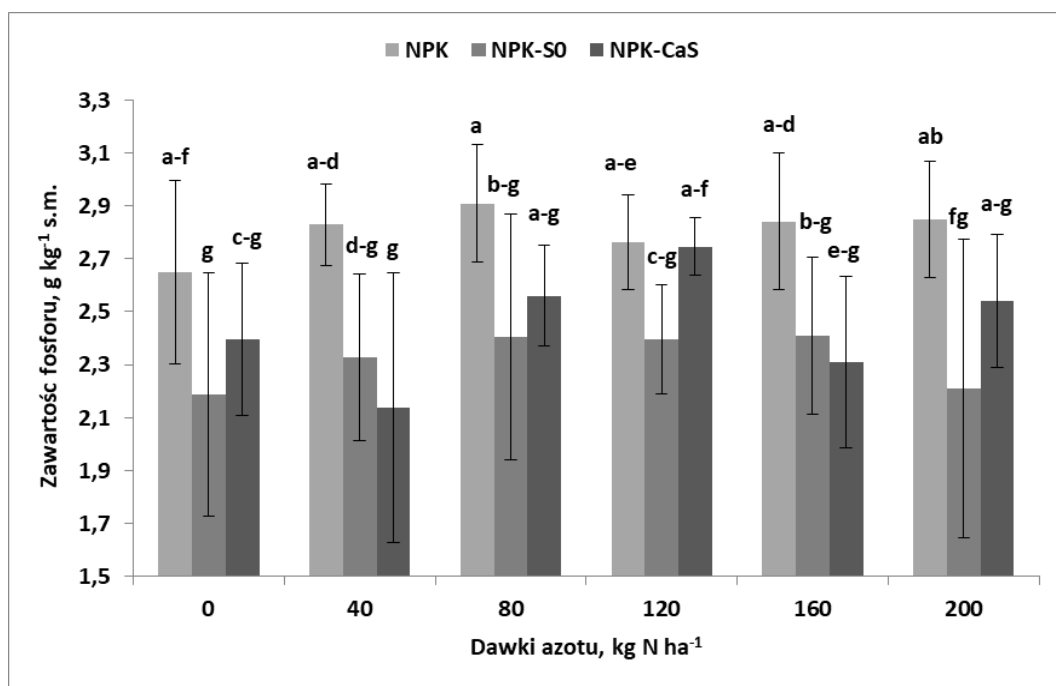
Źródło: opracowanie własne. ^ate same oznaczenia literowe oznaczają brak istotnych różnic między kolumnami; pionowy słupek w kolumnie określa wielkość standardowego błędu średniej.

Przeprowadzona analiza regresji krokowej potwierdziła zależność BM_{14} od Mg, lecz jednocześnie wskazała na istotną rolę P. Uzyskane równanie przedstawia się następująco:

$$BM_{14} = 0,31 + 0,08P - 0,0012Mg \text{ dla } n = 54, R^2 = 0,83, p \leq 0,001$$

Z uzyskanego równania wynika, że składnikiem w niedoborze był P a w nadmiarze Mg a oba te pierwiastki w 83% określały zmienność BM_{14} . Fosfor był dodatnio skorelowany z manganem (Mn) i wapniem (Ca) a ujemnie z sodem (Na), Mg i żelazem (Fe). Zawartość P wykazała zmienność w reakcji na współdziałanie $Lata \times SYS \times ND$ (zał.4.5a). Na kontroli N największą zawartość P stwierdzono na obiekcie NPK, a najmniejszą na obiekcie NPK-S0 (ryc. 4.11). Analiza wartości tej cechy na tle wzrastających dawek azotu wykazała swoistą specyfikę (ryc. Z4.11). Trend zawartości fosforu na NPK najlepiej opisuje funkcja kwadratowa. Maksymalna zawartość P wyniosła $2,94 \text{ g kg}^{-1} \text{ s.m.}$ i została uzyskana dla $N_{opt.} = 117,6 \text{ kg N ha}^{-1}$. Analogiczny trend odnotowano na obiekcie NPK-S0. Maksymalna zawartość P, wynosząca $2,44 \text{ g kg}^{-1} \text{ s.m.}$ otrzymano dla $N_{opt.} 104,5 \text{ kg N ha}^{-1}$. Istotną informacją jest fakt, że zawartość P_{maks} zmniejszała się o $0,5 \text{ g kg}^{-1} \text{ s.m.}$ a jednocześnie N_{opt} zmniejszyło się o $13,1 \text{ kg N ha}^{-1}$. Średnia zawartość P na obiekcie NPK-CaS kształtowała się na poziomie niższym,

średnio o 18%, niż dla NPK. Jednakże trend P z powodu zbyt dużych wahań dla dawek N nie został udowodniony. Wartości wskaźnika WZ dla SYS na tle dawek N były zmienne, lecz nie przekraczały 15%, wahając się w zakresie 7,9-14,7%. Wartości wskaźnika WZ dla dawek N na tle SYS były bardzo małe, a niezbilansowanie zawartości P wzrastało w kierunku: NPK (3,2%) < NPK-S0 (4,3%) < NPK-CaS (8,7%).



Ryc. 4.11. Wpływ współdziałania systemów nawożenia siarką i dawek azotu na zawartość fosforu w kukurydzy w stadium BBCH 14 – doświadczenie nienawadniane.

Źródło: opracowanie własne. ^ate same oznaczenia literowe oznaczają brak istotnych różnic między kolumnami; pionowy słupek w kolumnie określa wielkość standardowego błędu średniej.

Ocenę zawartości składników pokarmowych w kukurydzy w stadium BBCH 14 przeprowadzono także w oparciu o zakresy standardowe (*Amissah i in. 2023*). Zawartość N w roślinie w BBCH 14 w badanych latach była w normie. Dla P wartość poniżej minimum odnotowano w 2020 i 2022. Zawartość K była w normie, lecz tylko w 2020. Dla Mg odnotowano wartość mieszczącą się w zakresie normatywnym tylko w 2020. Zawartość Fe w latach 2020 i 2022 kształtowała się powyżej progu maksymalnego. Zawartość Mn we wszystkich latach prowadzenia badań pozostawała w normie. Zawartość Zn we wszystkich latach prowadzenia doświadczenia była poniżej a Cu mieściła się w zakresie optymalnym.

Tabela 4.5. Zawartość składników pokarmowych w kukurydzy w stadium BBCH 14 – doświadczenie nienawadniane.

Czynnik	Poziom Czynnika	N	P	K	Na	Mg	Ca	Fe	Mn	Zn	Cu
		g kg ⁻¹ s.m.			mg kg ⁻¹ s.m.						
Lata (L)	2020	43,3 ^{ab}	2,2 ^b	20,7 ^c	328 ^a	2309 ^a	425 ^c	253 ^b	53,9	21,3 ^b	4,0 ^c
	2021	42,4 ^b	3,0 ^a	29,9 ^b	273 ^b	998 ^c	800 ^a	164 ^c	55,4	22,0 ^b	5,7 ^b
	2022	43,7 ^a	2,3 ^b	36,5 ^a	344 ^a	1453 ^b	465 ^b	363 ^a	56,0	24,0 ^a	6,3 ^a
F _{ob} , P		4,4 [*]	128 ^{***}	225 ^{***}	31,3 ^{***}	585 ^{***}	392 ^{***}	454 ^{***}	0,8 ^{ns}	10,1 ^{***}	146 ^{***}
Systemy nawożenia siarką (SYS)	NPK	42,5	2,8 ^a	27,1 ^b	300 ^b	1383 ^b	749 ^a	201 ^c	59,2 ^a	22,4 ^{ab}	5,2 ^b
	NPK-S ⁰	43,4	2,3 ^c	30,4 ^a	325 ^a	1715 ^a	475 ^b	298 ^a	47,0 ^b	21,2 ^b	5,1 ^b
	NPK-CaSO ₄	43,4	2,4 ^b	29,6 ^a	320 ^{ab}	1663 ^a	466 ^b	281 ^b	59,1 ^a	23,7 ^a	5,7 ^a
F _{ob} , P		2,8 ^{ns}	46 ^{***}	10,7 ^{***}	3,9 [*]	42,1 ^{***}	239 ^{***}	123 ^{***}	33,8 ^{***}	8,0 ^{***}	9,4 ^{***}
Dawki azotu (ND) kg N ha ⁻¹	0	40,8 ^d	2,4 ^b	30,2 ^a	333 ^a	1617 ^a	577 ^a	268 ^{ab}	35,9 ^e	17,4 ^c	5,4 ^b
	40	41,5 ^{cd}	2,4 ^{ab}	30,0 ^a	288 ^b	1623 ^a	568 ^{ab}	245 ^b	46,4 ^d	20,8 ^b	6,1 ^a
	80	43,3 ^{bc}	2,6 ^a	29,8 ^a	301 ^{ab}	1658 ^a	593 ^a	249 ^b	51,5 ^{cd}	21,3 ^b	5,5 ^b
	120	43,1 ^{bc}	2,6 ^a	29,0 ^a	331 ^a	1615 ^a	559 ^{ab}	258 ^{ab}	73,4 ^a	26,1 ^a	5,5 ^b
	160	44,5 ^a	2,5 ^{ab}	27,5 ^a	310 ^{ab}	1502 ^a	516 ^b	263 ^{ab}	65,1 ^b	24,5 ^a	4,8 ^c
	200	45,4 ^{ab}	2,5 ^{ab}	27,9 ^a	326 ^{ab}	1506 ^a	568 ^a	278 ^a	58,2 ^c	24,6 ^a	4,8 ^c
F _{ob} , P		14,2 ^{***}	3,2 ^{**}	2,3 [*]	3,6 ^{**}	2,9 [*]	3,1 [*]	3,6 [*]	62,3 ^{***}	26,7 ^{***}	12,5 ^{***}
Średnia		43,1	2,5	29,1	314,8	1587	563,6	260,1	55,1	22,4	5,3
OSD		2,2	0,5	7,4	61,3	608	268,2	118,8	20,3	4,1	1,6
WZ, %		5,0	20,7	25,3	19,5	38,3	47,6	45,7	36,9	18,2	30,9

Źródło: opracowanie własne. ***, **, * - istotność na poziomie 0,001; 0,01; 0,05; ns – brak istotnego działania czynnika; ^a – ta sama litera w rzędzie oznacza brak istotnego zróżnicowania cechy w kolumnie dla danego czynnika; OSD – odchylenie standardowe; WZ – współczynnik zmienności.

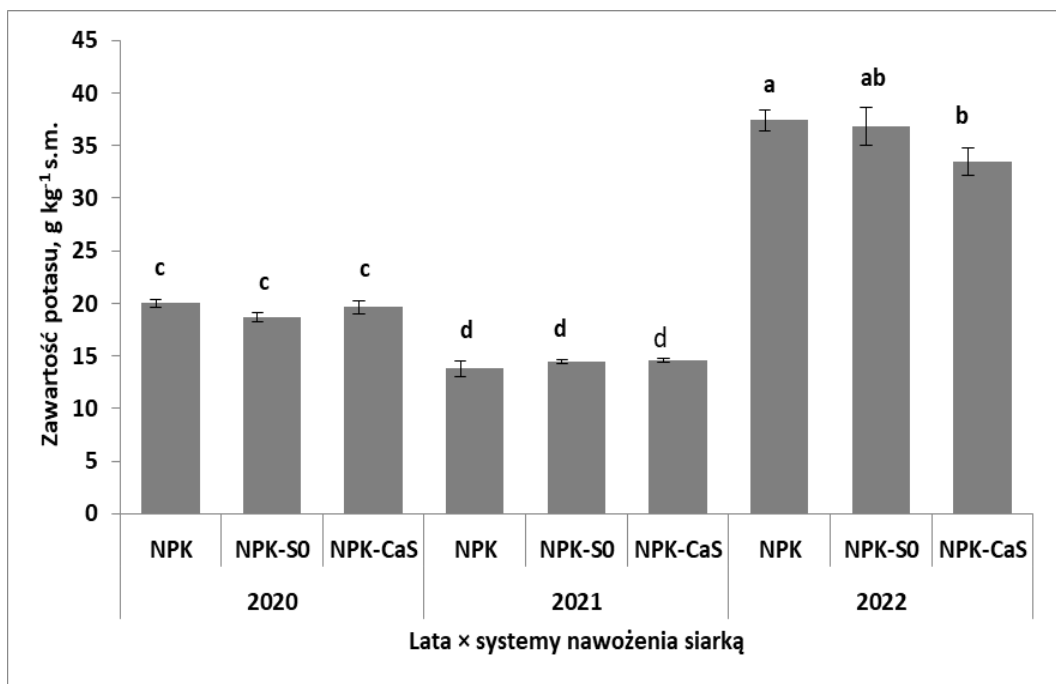
4.3b. Doświadczenie nawadniane

Z badanych 10 składników pokarmowych w kukurydzy w stadium BBCH 14 tylko cztery, to znaczy Na, Ca, Mn i Cu wykazały zależność od współdziałania Lata \times SYS \times ND (zał. 4.6a). Zawartość Mg i Zn zależała od współdziałania Lata \times ND a N od Lat \times SYS. Jakikolwiek brak współdziałania między czynnikami doświadczalnymi i latami odnotowano dla P, K i Fe. Wartości wskaźnika, jakim jest WZ, wahały się od 4% dla N do 118,1% dla P (tab. 4.6). Najmniejszą zmienność zawartości pierwiastków w kukurydzy, czyli $< 15\%$ odnotowano poza N, także dla Na, Fe i Cu. Pozostałe pierwiastki, za wyjątkiem P, mieściły się w klasie zmienności umiarkowanej (15-35%).

Przeprowadzona analiza regresji krokowej wykazała istotny wpływ zawartości K w kukurydzy w stadium BBCH 14 na plon ziarna. Uzyskane równanie przedstawia się następująco:

$$PLZ = 6,89 + 0,11K \text{ dla } n = 54, R^2 = 0,39, p \leq 0,001$$

Z powyższego równania wynika, że plon ziarna kukurydzy w omawianym stadium ograniczała zawartość K. Jednakże wartość współczynnika determinacji (R^2), wynosząca 39%, wskazuje na duży wpływ innych czynników. Zawartość omawianego składnika w kukurydzy w stadium BBCH 14 istotnie zależała od współdziałania Lata \times SYS (tab. 4.6a), lecz zasadniczo wynikała z działania lat (ryc. 4.12). Największą zawartość składnika ($> 30 \text{ g kg}^{-1} \text{ s.m.}$) odnotowano w 2022 roku ($35,9 \pm 2,1 \text{ g kg}^{-1} \text{ s.m.}$). Jednocześnie odnotowano istotny spadek na obiektach z siarką w stosunku do NPK, który dla NPK-CaS, wyniósł 11%. W pozostałych latach zawartość składnika w roślinie była znacznie mniejsza, zwłaszcza w 2021, gdy stanowiła zaledwie 40% wartości w 2022 ($14,2 \pm 0,4 \text{ g kg}^{-1} \text{ s.m.}$). Zawartość K była istotnie, lecz ujemnie skorelowana z zawartością N, P, Mn, Zn, a dodatnio z Ca i Fe. największą siłę tego związku odnotowano dla Fe ($r = 0,80^{***}$) (zał. 4.6b).



Ryc. 4.12. Wpływ współdziałania lat i systemów nawożenia siarką na zawartość potasu w kukurydzy w stadium BBCH 14 – doświadczenie nawadniane.

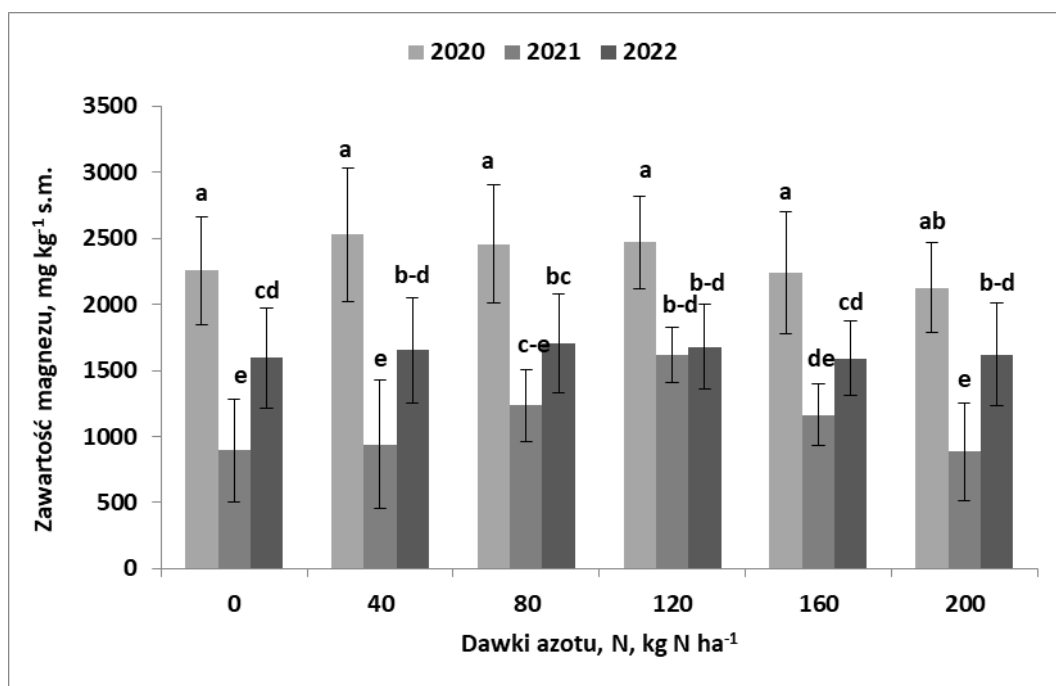
Źródło: opracowanie własne. ^ate same oznaczenia literowe oznaczają brak istotnych różnic między kolumnami; pionowy słupek w kolumnie określa wielkość standardowego błędu średniej.

Istotny wpływ na biomasa kukurydzy w stadium BBCH 14 wywierało pięć pierwiastków, w tym dodatnio K i Cu a ujemnie N, Pa i Mg. Analiza regresji krokowej wykazała, że istotny wpływ na badaną cechę miały dwa pierwiastki, a mianowicie K i Mg. Otrzymano następujące równanie:

$$BM_{14} = 0,25 + 0,004K - 0,0001Mg \text{ dla } n = 54, R^2 = 0,68 \text{ i } p \leq 0,001$$

Z uzyskanego równania wynika, że składnikiem w niedoborze w tym stadium rozwoju kukurydzy był K, a w nadmiarze Mg. Te dwa składniki wyjaśniały w 68% zmienności biomasy rośliny w stadium BBCH 14. Mg był istotnie i dodatnio skorelowany z N, Na, Ca, Fe, Mn a ujemnie z P, Mn, Cu, Zn. Największą zawartość Mg odnotowano w 2020 a najmniejszą w 2021 (ryc. 4.13). W 2020, średnia zawartość Mg przekraczała nieznacznie 2300 mg kg⁻¹ s.m., podczas gdy w 2021 była ponad 2-krotnie mniejsza (tab. 4.6). Trend zawartości Mg na tle wzrastających dawek azotu był zmienny dla systemów nawożenia siarką (ryc. Z4.12). Na obiektach NPK i NPK-S0 przebieg trendu najlepiej opisuje funkcja kwadratowa. Maksymalna zawartość Mg dla NPK wyniosła 2489 g kg⁻¹ s.m. i została uzyskana dla $N_{opt} = 81 \text{ kg N ha}^{-1}$. Różnica w zawartości Mg między systemem NPK a NPK-S0 Mg na kontroli azotowej wyniosła aż 40 %. Maksymalną zawartość Mg wynoszącą 1381 g kg⁻¹ s.m. odnotowano dla dawki $N_{opt} = 110 \text{ kg N ha}^{-1}$.

Na obiekcie NPK-CaS zawartość Mg była istotnie mniejsza, niż na NPK, lecz wpływ dawek N okazał się nieistotny. Wartości wskaźnika WZ dla lat na tle dawek azotu były ekstremalnie duże, wahając się w zakresie 31,4% na kombinacji 120 kg N ha⁻¹ do 60,7% na kontroli N. Wartości wskaźnika WZ dla dawek azotu na tle lat były zmienne i niebilansowane na obiekcie NPK-S0 (25,2%). Na pozostałych obiektach były natomiast małe, zwłaszcza na NPK-CaS (2,8%).



Ryc. 4.13. Wpływ współdziałania lat i systemów nawożenia siarką na zawartość magnezu w kukurydzy - doświadczenie nawadniane.

Źródło: opracowanie własne. ^ate same oznaczenia literowe oznaczają brak istotnych różnic między kolumnami; pionowy słupek w kolumnie określa wielkość standardowego błęd średniej.

Ocenę zawartości składników pokarmowych w kukurydzy w stadium BBCH 14 przeprowadzono analogicznie, jak dla obiektu nienawadnianego, w oparciu o zakresy standardowe (Amisshah *i in.* 2023). Zawartość N w roślinie w stadium BBCH 14 we wszystkich badanych latach była w normie. Dla P, zawartość w normie odnotowano tylko w 2021. Dla K wartości poniżej normy stwierdzono w latach 2020 i 2021. Zawartość Mg i Ca poniżej normy wystąpiła tylko w 2021. Zawartość Fe i Cu w latach badań pozostawała w normie. Dla Mn zawartość poniżej normy odnotowano tylko w roku 2022. Zawartość cynku tylko w roku 2021 pozostała w normie (tab. 4.6).

Tabela 4.6. Zawartość składników pokarmowych w kukurydzy w stadium BBCH 14 – doświadczenie nawadniane.

Czynnik	Poziom Czynnika	N	P	K	Na	Mg	Ca	Fe	Mn	Zn	Cu
		g kg ⁻¹ s.m.						mg kg ⁻¹ s.m.			
Lata (L)	2020	43,1 ^a	2,44 ^a	19,4 ^b	355 ^a	2345 ^a	4019 ^a	248 ^b	44,1 ^b	18,7 ^b	4,4 ^b
	2021	39,6 ^b	3,61 ^b	14,2 ^c	300 ^b	1121 ^c	1579 ^b	185 ^c	74,9 ^a	28,5 ^a	5,6 ^a
	2022	38,8 ^c	1,91 ^c	35,9 ^a	278 ^b	1640 ^b	4171 ^a	294 ^a	36,8 ^c	16,9 ^c	5,4 ^a
F _{ob} , P		83,6 ^{***}	377 ^{***}	628 ^{***}	24,0 ^{***}	205 ^{ns}	200 ^{***}	84,7 ^{***}	155 ^{***}	148 ^{***}	20,7 ^{***}
Systemy nawożenia siarką (SYS)	NPK	40,6	2,76 ^a	23,7	304	1757 ^a	3306	237	51,2	20,2 ^b	5,2
	NPK-S ⁰	40,2	2,61 ^{ab}	23,3	324	1792 ^a	3348	248	53,5	21,7 ^{ab}	5,2
	NPK-CaSO ₄	40,8	2,60 ^b	22,5	305	1558 ^b	3116	241	51,2	22,2 ^a	4,9
F _{ob} , P		1,4 ^{ns}	3,9 [*]	1,8 ^{ns}	2,0 ^{ns}	8,7 ^{***}	1,4 ^{ns}	0,9 ^{ns}	0,7 ^{ns}	3,9 [*]	1,3 ^{ns}
Dawki azotu (ND) kg N ha ⁻¹	0	37,5 ^d	2,59	23,6	301	1582 ^{bc}	2719 ^c	241	35,3 ^d	17,5 ^c	5,1
	40	39,9 ^c	2,64	24,1	318	1706 ^{a-c}	3484 ^{ab}	247	47,6 ^c	19,5 ^{bc}	5,0
	80	40,1 ^{ab}	2,70	24,2	324	1798 ^{ab}	3273 ^{a-c}	237	48,2 ^c	21,3 ^b	5,3
	120	40,8 ^{ab}	2,65	23,0	315	1920 ^a	3721 ^a	246	58,5 ^b	22,3 ^b	4,8
	160	41,5 ^b	2,61	21,9	292	1665 ^{bc}	3036 ^{bc}	238	51,5 ^{cd}	22,4 ^{ab}	5,4
	200	43,2 ^a	2,75	22,4	314	1542 ^c	3305 ^{a-c}	244	70,6 ^a	25,2 ^a	5,1
F _{ob} , P		27,8 ^{***}	0,9 ^{ns}	2,1 ^{ns}	1,1 ^{ns}	5,3 ^{***}	5,7 ^{***}	0,2 ^{ns}	26,5 ^{***}	13,4 ^{***}	1,4 ^{ns}
Średnia		40,5	21,2	23,2	310,9	1702	3256	242,2	52,0	21,4	5,1
OSD		1,6	25,1	4,9	19,4	284	665	23,7	11,8	3,2	0,3
WZ, %		4,0	118,4	21,0	6,2	16,7	20,4	9,8	22,6	15,1	6,2

Źródło: opracowanie własne. ***, **, * - istotność na poziomie 0,001; 0,01; 0,05; ns – brak istotnego działania czynnika; ^a – ta sama litera w rzędzie oznacza brak istotnego zróżnicowania cechy w kolumnie dla danego czynnika; OSD – odchylenie standardowe; WZ – współczynnik zmienności.

4.4. Liść podkolbowy – zawartość składników pokarmowych – stan odżywienia

4.4a. Doświadczenie nienawadniane

Zawartość K, Na, Fe i Zn w liściu podkolbowym kukurydzy na początku kwitnienia (stadium BBCH 61) zależała od współdziałania Lata × SYS × ND (zał. 4.7a). Zawartość Mn kształtowało współdziałanie SYS × ND, a N i Cu współdziałanie Lata × ND. Natomiast zawartość S, P, Mg i Ca była istotnie zmienna w latach, a działanie czynników doświadczalnych odnotowano tylko dla S i dotyczyło SYS. Uwagi wymaga Ca, którego zawartość w 2021 i 2022 była ponad 2-krotnie mniejsza, niż w 2020. Ocenie statystycznej poddano także indeks SPAD i stosunek N/S. Wartość pierwszego wskaźnika zależała od współdziałania Lata × ND a drugi wykazał tylko zmienność w latach. Wartości stosunku N/S zmniejszały się istotnie w kierunku: 2021 > 2020 > 2022 (tab. 4.7 i zał. 4.7a). Spośród analizowanych składników pokarmowych najmniejszą wartość współczynnika zmienności ($WZ < 15\%$) odnotowano dla N, P i Fe oraz indeksu SPAD. Dla S, Mg, Zn, Cu oraz stosunku N/S wartości współczynnika mieściły się średnim zakresie (15-35%). Największą zmienność odnotowano dla K, Mn, a zwłaszcza Ca i Na, dla których WZ przekraczał 50%.

Istotny i dodatni związek korelacyjny między plonem ziarna a składnikami pokarmowymi odnotowano dla S, K i Zn, a istotny, lecz ujemny dla Ca (zał. 4.7b). Z przeprowadzonej analizy regresji krokowej wynika, że głównym determinantem plonu ziarna kukurydzy był Ca. Uzyskane równanie przedstawia się następująco:

$$PLZ = 8,43 - 0,007Ca \text{ dla } n = 54, R^2 = 0,15 \text{ i } p \leq 0,01$$

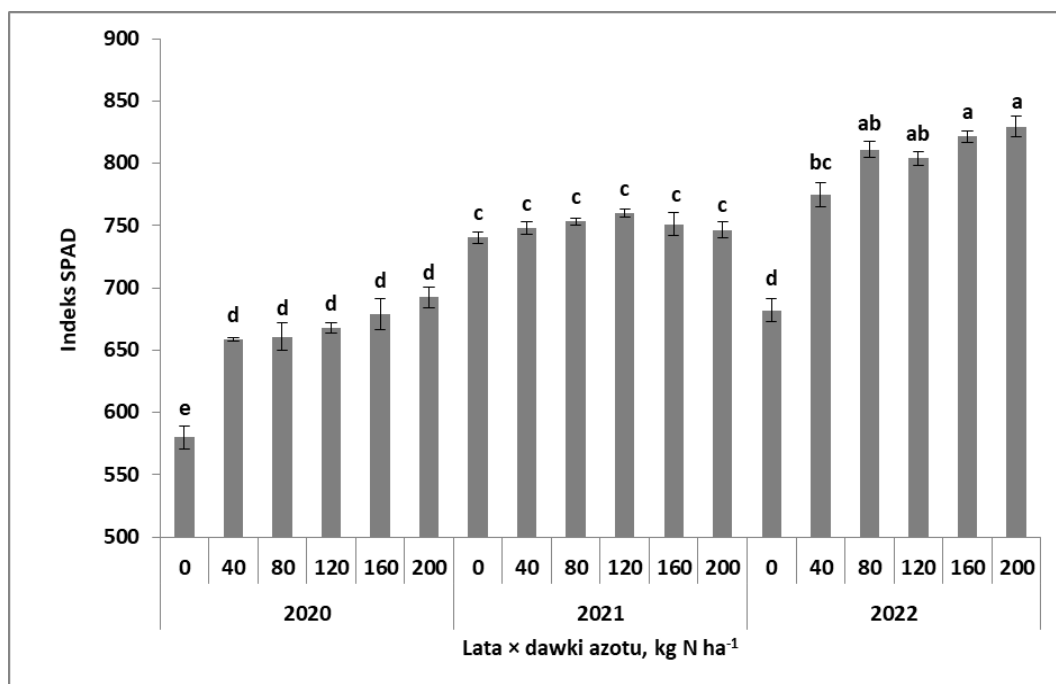
Z równania tego wynika, że wzrost zawartości Ca w liściu podkolbowym kukurydzy prowadził do spadku plonu ziarna. Jednakże wartość predykcji plonu, wynikająca z R^2 jest ekstremalnie mała. Zależność ta wynikała z faktu, że w roku 2022 z największymi plonami ziarna, zawartość Ca w liściu podkolbowym była najmniejsza (tab. 4.7).

Znacznie większą wartość predykcji otrzymano dla indeksu SPAD jako zmiennej niezależnej:

$$PLZ = 0,51 + 0,01SPAD \text{ dla } n = 54, R^2 = 0,32 \text{ i } p \leq 0,001$$

Wartości indeksu SPAD zależały od współdziałania Lata × ND (ryc. 4.14). Na kontroli azotowej wartości indeksu wzrastały istotnie w kierunku: 2020 < 2022 ≤ 2021. W 2020

wartość indeksu zwiększyła się pod wpływem zastosowanego N, lecz nie odnotowano reakcji na wzrastające dawki azotu. W 2022 odnotowano podobny trend, jak w 2020, lecz wzrost wartości SPAD zachodził istotnie aż do kombinacji 160 kg N ha⁻¹. W 2021 wartość indeksu SPAD na kontroli N była bardzo wysoka i kształtowała się na takim samym poziomie, jak na kombinacjach nawożonych N.



Ryc. 4.14. Wpływ współdziałania lat i dawek azotu na indeksy SPAD w liściu podkolbowym kukurydzy w stadium BBCH 61 – doświadczenie nienawadniane.

Źródło: opracowanie własne. ^ate same oznaczenia literowe oznaczają brak istotnych różnic między kolumnami; pionowy słupek w kolumnie określa wielkość standardowego błędu średniej.

Dodatni związek korelacyjny indeksu SPAD z plonem i z zawartością N pośrednio wskazuje, że w stadium BBCH 61 plon ziarna ograniczał N. Wartość omawianego indeksu, jak wynika z przeprowadzonej analizy regresji krokowej, istotnie zależała, jednakże od kilku innych pierwiastków:

$$SPAD = 395,3 + 128,9S - 0,03Ca + 27,3Cu \text{ dla } n = 54, R^2 = 0,72 \text{ i } p \leq 0,001$$

Z równania tego wynika, że wartość indeksu SPAD ograniczał niedobór S i Cu, jak i nadmiar Ca w liściu podkolbowym kukurydzy. Pomimo, że zawartość Cu wykazała reakcję na współdziałanie Lata × ND, to na największą wartość Cu odnotowano w 2021 roku, w którym to plon ziarna był najmniejszy. Natomiast najmniejszą zawartość tego pierwiastka natomiast odnotowano w 2022, w którym plon ziarna był największy. Jednocześnie tylko w tym roku ujawniło się dodatnie działanie większych dawek azotu (ryc. Z.4.13).

Zawartość siarki (S) w liściu podkolbowym była dodatnio i wysoce ($r = 0,83^{***}$) skorelowana z zawartością N, lecz ujemnie ze stosunkiem N/S (tab. 4.7b). Relację między zawartością S a wartością stosunku N/S najlepiej opisuje nie funkcja liniowa, lecz kwadratowa:

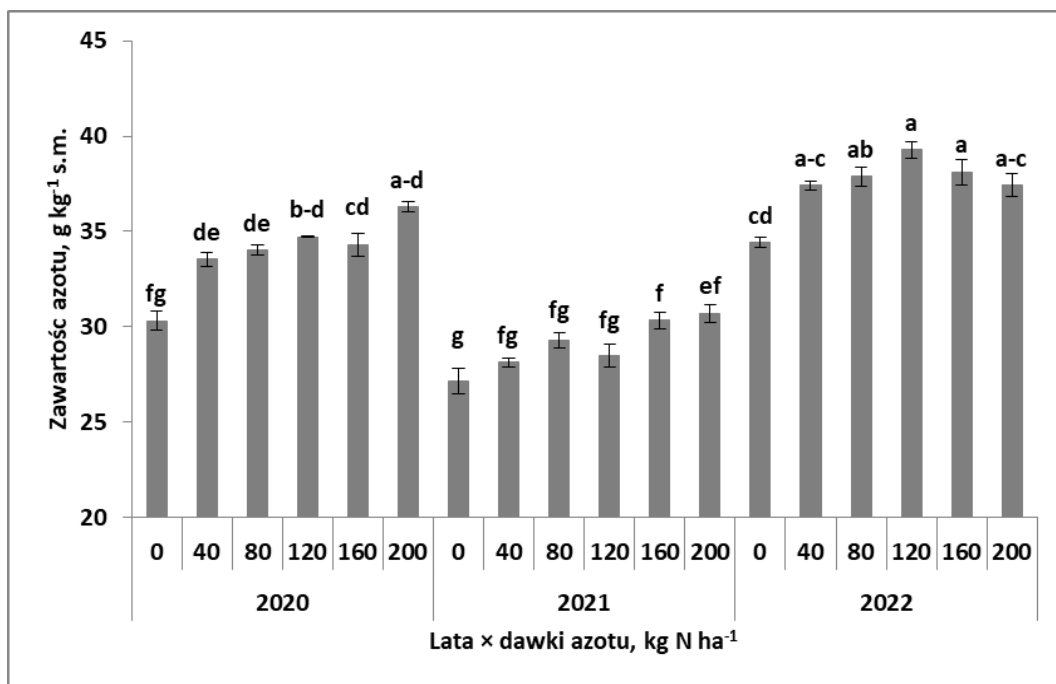
$$N/S = 13,9S^2 - 60,4S + 82,4 \text{ dla } n = 54, R^2 = 0,81 \text{ i } p \leq 0,001$$

Minimalną wartość stosunku N/S, wynosząca 16,8 wyznaczała zawartość S = 2,2 g kg⁻¹ s.m.. Taką zawartość S odnotowano w 2022, w którym uzyskano największe plony ziarna. Z analizy regresji krokowej wynika że wartość omawianego wskaźnika zależała od szerszej gamy składników pokarmowych:

$$\frac{N}{S} = 28,4 + 0,71N - 18S - 0,003Ca + 0,7Mn \text{ dla } n = 54, R^2 = 0,84 \text{ i } p \leq 0,001$$

Zawartość S w liściu podkolbowym, analogicznie jak zawartość N, była najmniejsza w 2021, a największa w 2022 (+75%). Jednocześnie stwierdzono wzrost zawartości S w reakcji na zastosowanie siarki, zwłaszcza CaSO₄ × 2H₂O, czego nie zaobserwowano dla N (tab. 4.7). Ponadto, zawartość N była dodatnio skorelowana z zawartością S, lecz ujemnie z N/S (zał. 4.7b). Relacja ta informuje, że spadek zawartości N w liściu podkolbowym zawężał wartość relacji N/S. Związek wartości tego wskaźnika z plonem ziarna okazał się istotny, wykazując przebieg zgodny z funkcją kwadratowa. Z analizy tej funkcji wynika, że minimalny plon ziarna, wynoszący 6,97 t ha⁻¹ odnotowano dla N/S = 25,5. Zawężenie tej relacji prowadziło do wzrostu plonu (ryc. Z.4.14).

Zawartość N w liściu podkolbowym zależała od współdziałanie Lata x ND (ryc. 4.15). Cechą wspólną dla wszystkich lat badań jest to, że na kontroli N zawartość składnika w liściu wskaźnikowym kukurydzy w danym roku zawsze była najmniejsza, lecz różna w latach. W 2021 zawartość N była najmniejsza, lecz zaznaczył się niewielki trend wzrostu wraz ze wzrostem dawki N. Analogiczny trend zaznaczył się w 2020, lecz zawartość azotu, włącznie z kontrolą N, była istotnie większa. Całkowicie odmienny trend zawartości N odnotowano 2022, w którym wartości tego składnika na kontroli N były największe. Ponadto do dawki 120 kg N ha⁻¹ następował wzrost, a powyżej nastąpił spadek zawartości N.



Ryc. 4.15. Wpływ współdziałania lat z dawkami azotu na zawartość azotu w liściu podkolbowym kukurydzy w stadium BBCH 61 – doświadczenie nienawadniane. Źródło: opracowanie własne. ^ate same oznaczenia literowe oznaczają brak istotnych różnic między kolumnami; pionowy słupek w kolumnie określa wielkość standardowego błęd średniej.

Ocenę stanu zawartości składników pokarmowych liścia podkolbowego kukurydzy w stadium BBCH 65 przeprowadzono także w odniesieniu do zakresów optymalnych (zał. 5.4; Benton Jones, Jr. 2003). Zawartość N we wszystkich latach badań mieściła się w zakresie optymalnym. Zawartości siarki w 2020 i 2021 była mała, poniżej dolnej granicy zakresu. Zawartość P, Mg, Mn i Fe we wszystkich latach badań kształtowała się poniżej dolnej wartości zakresu. Dla K wartości mieszczące się w zakresie optymalnym odnotowano tylko w 2022. Zawartość Ca w 2021 i 2020 znajdowała się w zakresie optymalnym. Dla Cu wartości mieszczące się w zakresie optymalnym odnotowano tylko w 2021. Zawartość Zn we wszystkich latach badań była poniżej dolnej wartości zakresu.

Tabela 4.7. Zawartość składników pokarmowych w liściu podkolbowym kukurydzy i indeksy odżywienia w stadium BBCH 61 – doświadczenie nienawadniane.

Czynnik	Poziom Czynnika	g kg ⁻¹ s.m.					mg kg ⁻¹ s.m.								N/S
		N	S	P	K	Na	Mg	Ca	Fe	Mn	Zn	Cu	SPAD		
Lata (L)	2020	33,9 ^b	1,4 ^b	2,1 ^a	10,1 ^c	184 ^b	1483 ^a	2199 ^a	77,3 ^a	41,3 ^b	16,3 ^c	5,8 ^b	656 ^c	24,5 ^b	
	2021	29,0 ^c	1,2 ^c	2,1 ^a	11,8 ^b	97 ^c	1001 ^b	1033 ^b	80,8 ^a	68,0 ^a	18,9 ^b	8,2 ^a	750 ^b	29,8 ^a	
	2022	37,4 ^a	2,1 ^a	1,7 ^b	20,9 ^a	355 ^a	1461 ^b	828 ^b	66,8 ^b	37,8 ^b	21,4 ^a	5,1 ^c	787 ^a	17,8 ^c	
F _{ob, p}		259***	119***	46,3***	644***	468***	17,3***	119***	42,3***	116***	48,1***	245***	424***	21,9***	
Systemy nawożenia siarką (SYS)	NPK	33,3	1,5 ^b	2,0	14,2	213	1433	1346	77,2 ^a	47,7	18,7 ^b	6,4	728	25,2	
	NPK-S ⁰	33,4	1,5 ^b	1,9	14,5	209	1229	1393	72,8 ^b	49,6	18,9 ^b	6,3	733	24,8	
	NPK-CaSO ₄	33,6	1,7 ^a	2,0	14,2	214	1284	1321	75,0 ^{ab}	49,9	19,1 ^a	6,4	732	22,1	
F _{ob, P}		0,3 ^{ns}	4,6 [*]	1,3 ^{ns}	0,5 ^{ns}	0,2 ^{ns}	2,6 ^{ns}	0,3 ^{ns}	3,8 [*]	0,6 ^{ns}	0,3 [*]	0,4 ^{ns}	0,6 ^{ns}	1,7 ^{ns}	
Dawki azotu (ND) kg N ha ⁻¹	0	30,6 ^c	1,5	1,9	13,8 ^b	212 ^{ab}	1177	1123	74,4 ^a	31,7	16,1 ^c	5,9 ^d	668 ^c	23,9	
	40	33,0 ^b	1,5	1,9	13,5 ^b	202 ^b	1487	1538	71,8 ^a	39,4	16,3 ^c	6,1 ^{cd}	727 ^b	23,8	
	80	33,7 ^{ab}	1,6	2,0	14,2 ^b	209 ^{ab}	1260	1371	77,5 ^a	43,2	17,8 ^{bc}	6,2 ^{b-d}	742 ^{ab}	23,6	
	120	34,2 ^{ab}	1,6	2,0	15,9 ^a	204 ^{ab}	1346	1340	72,3 ^a	56,9	19,4 ^b	6,8 ^a	744 ^{ab}	24,7	
	160	34,3 ^{ab}	1,6	2,0	14,2 ^b	238 ^a	1277	1417	75,9 ^a	64,5	21,7 ^{ab}	6,6 ^{a-c}	750 ^a	25,4	
200	34,8 ^a	1,7	2,0	14,0 ^b	208 ^b	1344	1331	78,0 ^a	58,5	22,1 ^a	6,7 ^{ab}	756 ^a	22,7		
F _{ob, p}		16,3***	2,2 ^{ns}	1,1 ^{ns}	6,2***	2,4 [*]	1,3 ^{ns}	2,0 ^{ns}	2,7 [*]	34,8***	21,2***	7,1***	49,6***	0,3 ^{ns}	
Średnia		33,4	1,6	2,0	14,3	212,2	1315,1	1353,5	75,0	49,1	18,9	6,4	731	24,0	
OSD		2,1	0,4	0,2	5,3	118,3	361,7	678,9	10,4	20,6	3,7	1,5	67,1	6,3	
WZ,%		6,2	26,7	12,2	37,2	55,8	27,5	50,2	13,9	42,0	19,3	22,8	9,2	26,4	

Źródło: opracowanie własne. ***, **, * - istotność na poziomie 0,001; 0,01; 0,05; ns – brak istotnego działania czynnika; OSD – odchylenie standardowe; WZ – współczynnik zmienności; ^a – ta sama litera w rzędzie oznacza brak istotnego zróżnicowania cechy w kolumnie dla danego czynnika; SPAD – wskaźnik odczytu N-testera; N/S – indeks wartości niemianowana

4.4b. Doświadczenie nawadnianie

Jedynym pierwiastków, którego zawartość w liściu podkolbowym kukurydzy na początku kwitnienia zależała od współdziałania Lata \times SYS \times ND, był Mn (zał. 4.8b). Spośród 11 analizowanych pierwiastków reakcję na współdziałanie Lata \times SYS odnotowano dla N, P. Zawartość Ca zależała od współdziałanie Lata \times ND, a Cu od SYS \times ND. Wskaźnik SPAD wykazał zmienność w reakcji na współdziałanie Lata \times ND. Natomiast zawartość S, K, Na, Mg i Zn wykazała głównie w latach. Zawartość Fe wykazała reakcję na lata i czynniki doświadczalne, lecz nie na współdziałanie tych czynników (tab. 4.8). Zawartość S zależała istotnie od lat i systemu nawożenia siarką, lecz bez współdziałania między czynnikami. W 2022 zawartość S była 2-krotnie większa, niż w pierwszych dwóch latach badań. Wpływ zastosowania siarki w formie S⁰ prowadził do spadku a w formie CaSO₄ \times 2H₂O do wzrostu zawartości S w liściu podkolbowym w stosunku do wartości na NPK.

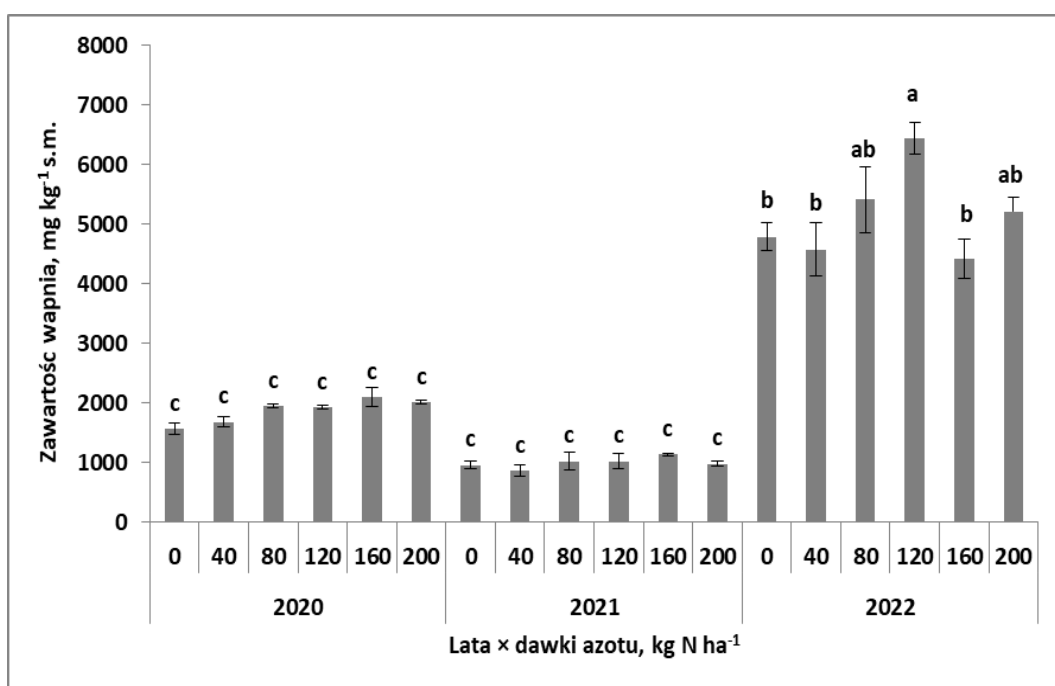
Zawartość K i Na w testowanej części kukurydzy wykazały zależność od lat i dawek N., lecz nie stwierdzono współdziałania między tymi czynnikami. W 2022 wartości obu cech były istotnie większe, niż w pozostałych latach badań. Zawartość K zwiększała się wraz dawką N do 120 kg ha⁻¹ a kolejne prowadziły do spadku. Natomiast zawartość Na wykazywała niestabilną reakcję na wzrastające dawki N, osiągając największe wartości na kombinacji 160 kg N ha⁻¹. Lata okazały się jedynym czynnikiem wywołującym zmienność zawartości Mg. Istotnie większe wartości odnotowano w 2020. Z tej grupy pierwiastków, jedynie Zn wykazał reakcję na lata i czynniki doświadczalne. Największą zawartość Zn stwierdzono w 2022 a najmniejszą w 2020. Wpływ SYS w stosunku do NPK ujawnił się tylko na obiekcie NPK-CaS. Wzrost dawek N prowadził do progresywnego wzrostu zawartości Zn. Wartości indeksu SPAD kształtowało współdziałanie Lata \times ND, a stosunek N/S nie zależał tylko od lat (zał. 4.8b). Wartość relacji N/S była największa w 2021, a najmniejsza w 2022 (tab. 4.8).

Spośród analizowanych składników pokarmowych najmniejszą wartość współczynnika zmienności (< 15%) odnotowano dla N, Fe oraz dla indeksu SPAD. W średnim zakresie zmienności (15-35%) mieściła się zawartość P, Mg, Zn i Cu. Dla pozostałych pierwiastków wartości WZ przekraczały 35 %, aczkolwiek dla S oraz K wartość ta była na granicy tego zakresu, wynosząc odpowiednio 35,2% o raz 36% (tab. 4.8).

Plon ziarna wykazał istotną i dodatnią zależność od 6 z 11 analizowanych pierwiastków (N, S, K, Na, Mg i Ca), a także od indeksu SPAD. Istotne, lecz ujemne zależności korelacyjne odnotowano dla P i Cu, a także dla stosunku N/S (zał. 4.8b). Plon ziarna, jak wynika z przeprowadzonej analizy regresji krokowej, wykazał istotną zależność od zawartości Ca w liściu podkolbowym. Otrzymaną zależność przedstawia równanie:

$$PLZ = 7,824 + 0,0006Ca \text{ dla } n = 54, R^2 = 0,46 \text{ dla } p \leq 0,001$$

Dodatnia wartość współczynnika kierunkowego dla otrzymanego równania wskazuje na Ca jako krytyczny składnik pokarmowy, warunkujący plon ziarna. Specyficzne działania Ca ujawniło się we współdziałaniu Lat \times ND (ryc. 4.16). W pierwszych dwóch latach, pomimo istotnej różnej zawartości Ca, nie stwierdzono reakcji tej cechy na wzrastające dawki azotu. Natomiast w 2022, po pierwsze odnotowano znacznie większą zawartość wapnia w liściu podkolbowym, a po drugie zaznaczył się wyraźny trend wzrostowy w reakcji na dawki N, który ujawnił się na kombinacjach 80 i 120 kg N ha⁻¹.

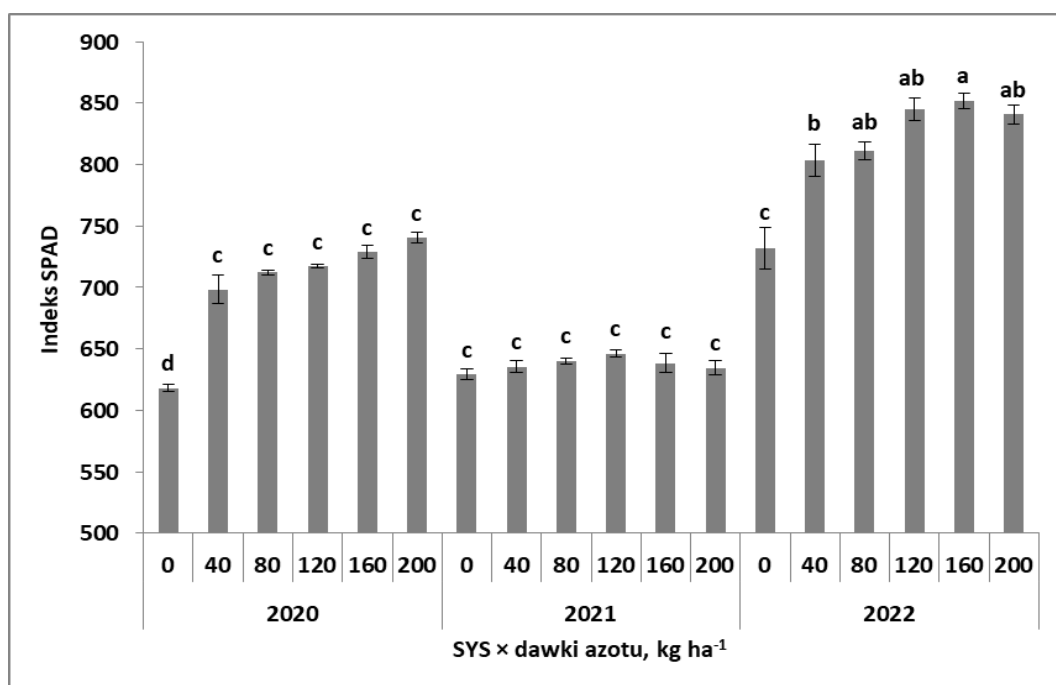


Ryc. 4.16. Wpływ współdziałania lat i dawek azotu na zawartość wapnia w liściu podkolbowym kukurydzy w stadium BBCH 65 – doświadczenie nawadniane. Źródło: opracowanie własne. ^ate same oznaczenia literowe oznaczają brak istotnych różnic między kolumnami; pionowy słupek w kolumnie określa wielkość standardowego błędu średniej.

Analiza regresji krokowej z uwzględnieniem zawartości składników pokarmowych w liściu podkolbowym a także obu wskaźników (SPAD, N/S) wskazała na indeks SPAD i Mn jako główne predykatory plonu ziarna:

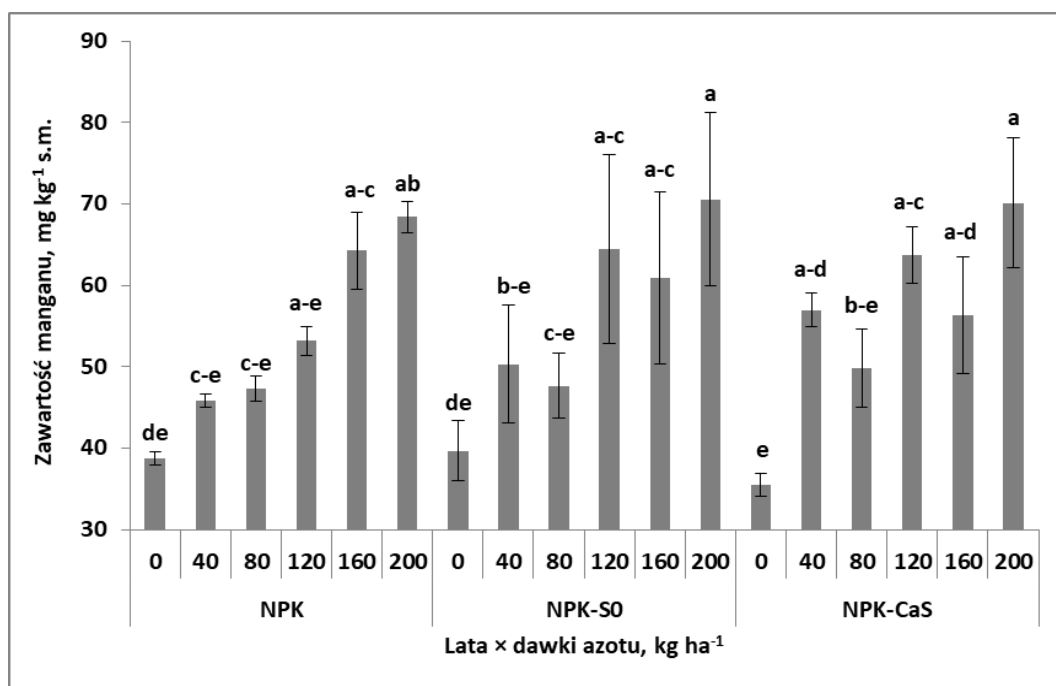
$$PLZ = -5,12 + 0,02Mn + 0,019SPAD \text{ dla } n = 54, R^2 = 0,55 \text{ i } p \leq 0,001$$

Indeks SPAD, pomimo istotności współdziałania Lata \times ND, wykazał głównie zmienność w latach (ryc. 4.17). Najmniejsze, średnie wartości indeksu, odnotowano w 2021, lecz jednocześnie nie stwierdzono reakcji na wzrastające dawki azotu. W 2020 i 2022 działanie dawek N w stosunku do kontroli N było istotne. W każdym roku wartości SPAD wzrastały wraz ze wzrostem dawki N. Zmienność ta spełnia normy funkcji kwadratowej (ryc. Z4.15). W 2020 istotny wzrost wartości indeksu odnotowano na kombinacji 40 kg N ha⁻¹ w stosunku do kontroli N. Jednakże, wartość indeksu uległa stabilizacji w reakcji na następne dawki N. Z otrzymanego równania natomiast wynika, że maksymalną wartość indeksu SPAD wynoszącą 745 odnotowano dla N_{opt} = 155 kg N ha⁻¹. W 2022, wartość indeksu SPAD na kontroli N była istotnie większa niż w pozostałych latach i przekraczała 700 jednostek. Odnotowano istotny wzrost w reakcji na 40 kg N ha⁻¹, a także niewielkie przyrosty w reakcji na kolejne dawki azotu. Maksymalna wartość indeksu wyniosła 760 jednostek przy N_{opt} = 154 kg N ha⁻¹.



Ryc. 4.17. Wpływ współdziałania lat i dawek azotu na wartość indeksu SPAD w liściu podkolbowym kukurydzy w stadium BBCH 61 – doświadczenie nawadniane.
Źródło: opracowanie własne. ^ate same oznaczenia literowe oznaczają brak istotnych różnic między kolumnami; pionowy słupek w kolumnie określa wielkość standardowego błędu średniej.

Zawartość Mn w liściu podkolbowym zależała od współdziałania Lat i czynników doświadczalnych (zał. 4.8a). Zależność tą przedstawiono dla współdziałania $SYS \times ND$ (ryc. 4.18). Dla każdego z obiektów odnotowano ogólny, dodatni trend wzrostu zawartości Mn w reakcji na wzrastające dawki azotu (ryc. Z4.16). Na każdym obiekcie największy wzrost wartości omawianej cechy odnotowano na kombinacji 40 kg N ha⁻¹ w stosunku do kontroli N. Na obiekcie NPK kolejny wzrost nastąpił na kombinacji 160 kg N ha⁻¹ w stosunku do 120 kg N ha⁻¹. Na obiekcie NPK-S0 potwierdziła się pierwsza prawidłowość, lecz wzrost zawartości Mn w reakcji na kolejne dawki N, okazał się skokowy. Zahamowanie wzrostu tej cechy w stosunku do poprzedzających dawek N odnotowano dla 80 kg N ha⁻¹ i 160 kg N ha⁻¹. Na obiekcie NPK-CaS odnotowano bardzo podobny trend, aczkolwiek przyrost zawartości Mn na kombinacji 40 kg N ha⁻¹ w stosunku do kontroli N był większy. Ogólny trend zawartości Mn w liściu podkolbowym okazał się liniowy, a różnica pomiędzy obiektami wynikała ze zmienności zawartości Mn, która malała w kierunku (R²) NPK (0,96) > NPK-S0 (0,87) > NPK-CaS (0,68).



Ryc. 4.18. Wpływ współdziałania systemów nawożenia siarką i dawek azotu na zawartość manganu w liściu podkolbowym kukurydzy w stadium BBCH 61 – doświadczenie nawadniane.

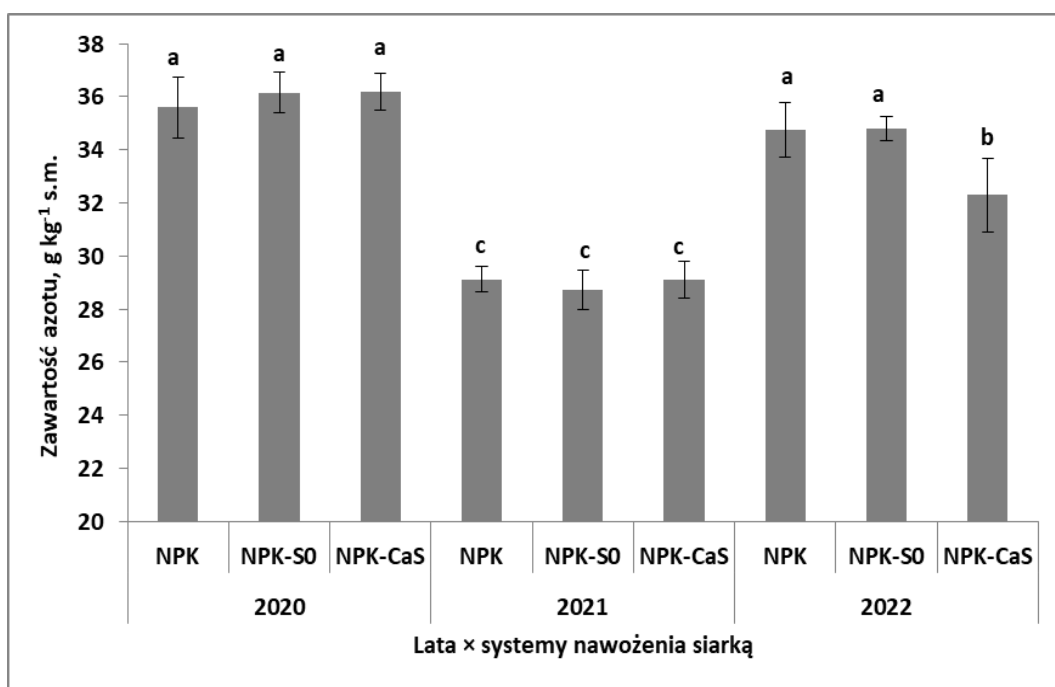
Źródło: opracowanie własne. ^ate same oznaczenia literowe oznaczają brak istotnych różnic między kolumnami; pionowy słupek w kolumnie określa wielkość standardowego błędu średniej.

Wartości indeksu SPAD, jak wynika z wykonanej analizy regresji krokowej, istotnie zależały nie tylko od zawartości N, lecz także Na i Ca. Zmienność zawartości

tych trzech pierwiastków w liściu podkolbowym kukurydzy w 92% kontrolowała zmienność wartości omawianego wskaźnika. Uzyskane równanie przedstawia się następująco:

$$SPAD = 298 + 8,84N + 0,33Na + 0,02Ca \text{ dla } n = 54, R^2 = 0,92 \text{ i } p \leq 0,001$$

Zawartość azotu w liściu podkolbowym w stadium BBCH 61 istotnie zależała od współdziałania Lata \times SYS (zał. 4.8a.). Jednak główną przyczyną zmienności tej cechy były lata. W latach 2020 i 2021 nie odnotowano istotnego wpływu systemów nawożenia siarka na zawartość N, aczkolwiek była istotnie większa w 2020 (ryc. 4.19). Jedyna różnica w działaniu SYS wystąpiła w roku 2022, w którym na obiekcie NPK-CaS odnotowano istotny spadek zawartości N w stosunku do notowanych dla pozostałych obiektów. Zawartość sodu (Na), jak wcześniej omówiono, była zmienna tylko w latach. Największą zawartość składnika odnotowano w 2022 i była 2-krotnie większa w porównaniu do 2020 i prawie 4-krotnie do 2021.



Ryc. 4.19. Wpływ współdziałania lat i systemów nawożenia siarką na zawartość azotu w liściu podkolbowym kukurydzy w stadium BBCH 61 – doświadczenie nawadniane. Źródło: opracowanie własne. ^ate same oznaczenia literowe oznaczają brak istotnych różnic między kolumnami; pionowy słupek w kolumnie określa wielkość standardowego błędu średniej.

Wskaźnik stanu odżywienia jakim jest stosunek N/S istotnie, lecz ujemnie zależał od zawartości S w liściu podkolbowym w stadium BBCH 65 ($r = -0,91^{***}$) (zał. 4.8b):

$$N/S = 44 - 12,1S \text{ dla } n = 54, R^2 = 0,82 \text{ i } p \leq 0,001$$

Zależność między zawartością S a stosunkiem N/S najlepiej jednak opisuje funkcja kwadratowa:

$$N/S = 6,57S^2 - 37,6S + 66 \text{ dla } n = 54, R^2 = 0,88 \text{ i } p \leq 0,001$$

Minimalna wartość N/S dla tej funkcji wynosi 12,2 i została wykazana dla $S = 2,9 \text{ g kg}^{-1}$ s.m.. Zatem, spadek wartości indeksu jest jednoznaczny ze zawężeniem stosunku N/S. Związek między wartością omawianego indeksu a plonem ziarna w najlepszy sposób (R^2) oddaje funkcja kwadratowa (ryc. Z4.17). Najmniejszy plon ziarna wynoszący $8,5 \text{ t ha}^{-1}$ odnotowano dla $N/S = 31,3$. Zawężenie tej relacji prowadziło do wzrostu plonu ziarna.

Ocenę zawartości składników pokarmowych w liściu podkolbowym kukurydzy w stadium BBCH 61 przeprowadzono także na podstawie optymalnych zakresów (zał. 5.4; Benton Jones, Jr. 2003). Zawartość N mieściła się w zakresie optymalnym. Natomiast zawartość S, K i Ca tylko w 2022 mieściła się w zakresie optymalnym. Dla P wartości poniżej dolnej wartości zakresu odnotowano w 2020 i 2022. Dla Mg otrzymane wartości kształtowały się we wszystkich latach badań poniżej dolnej wartości zakresu optymalnego. Zawartości Fe i Mn we wszystkich latach prowadzonych badań mieściły się w zakresie optymalnym. Zawartość Zn pozostawała poniżej dolnej wartości zakresu optymalnego. Zawartość Cu tylko w 2022 mieściła się dolnej wartości zakresu optymalnego.

Tabela 4.8. Zawartość składników pokarmowych w liściu podkolbowym kukurydzy i indeksy odżywienia w stadium BBCH 61 – doświadczenie nawadniane.

Czynnik	Poziom Czynnika	N	S	P	K	Na	Mg	Ca	Fe	Mn	Zn	Cu	SPAD	N/S
Lata (L)	2020	36,0 ^a	1,3 ^b	2,4 ^b	9,9 ^c	169 ^b	1353 ^b	1862 ^b	87,2	34,6 ^c	16,6 ^b	7,2 ^a	703 ^b	27,7 ^a
	2021	29,0 ^c	1,2 ^b	3,2 ^a	14,1 ^b	170 ^b	1063 ^c	991 ^c	83,7	88,0 ^a	19,1 ^a	7,3 ^a	637 ^c	29,1 ^a
	2022	34,0 ^b	2,5 ^a	1,6 ^c	22,8 ^a	334 ^a	1763 ^a	5128 ^a	83,0	41,3 ^b	17,7 ^b	4,4 ^b	814 ^a	13,8 ^b
F _{ob, p}		195 ^{***}	271 ^{***}	367 ^{***}	907 ^{***}	190 ^{***}	159 ^{***}	435 ^{***}	2,1 ^{ns}	321 ^{***}	10,0 ^{***}	192 ^{***}	559 ^{***}	44,0 ^{***}
Systemy nawożenia siarką (SYS)	NPK	33,2	1,7 ^{ab}	2,5 ^a	15,9	228	1439	2767	85,3	52,9	17,6 ^b	6,5 ^a	722	24,2
	NPK-S ⁰	33,2	1,6 ^b	2,3 ^a	15,2	219	1379	2614	85,0	55,6	16,9 ^b	6,0 ^b	719	24,7
	NPK-CaSO ₄	32,5	1,8 ^a	2,3 ^a	15,6	227	1362	2601	83,7	55,4	18,9 ^a	6,4 ^{ab}	713	21,7
F _{ob, p}		2,2 ^{ns}	3,8 [*]	3,4 [*]	2,8	0,5 ^{ns}	2,1 ^{ns}	0,8 ^{ns}	0,3 ^{ns}	0,8 ^{ns}	6,5 ^{**}	4,3 [*]	1,4 ^{ns}	1,6 ^{ns}
Dawki azotu (ND) kg N ha ⁻¹	0	30,0 ^c	1,7	2,3	15,4	219	1205 ^b	2431	82,2	38,0 ^c	15,4 ^c	6,0 ^{bc}	660 ^c	21,7
	40	32,1 ^b	1,7	2,4	15,1	219	1388 ^a	2363	83,4	51,0 ^b	16,3 ^c	6,0 ^{bc}	713 ^b	22,9
	80	32,9 ^b	1,7	2,4	15,6	242	1417 ^a	2785	86,5	48,2 ^b	16,6 ^{bc}	5,9 ^c	721 ^{ab}	23,0
	120	33,5 ^{ab}	1,7	2,4	15,6	211	1428 ^a	3120	83,6	60,4 ^a	18,8 ^{ab}	6,7 ^a	736 ^a	24,6
	160	34,6 ^a	1,7	2,4	15,8	230	1431 ^a	2539	85,9	60,5 ^a	19,1 ^a	6,6 ^{ab}	740 ^a	25,8
	200	34,8 ^a	1,7	2,4	16,0	226	1491 ^a	2726	86,3	69,7 ^a	20,6 ^a	6,7 ^a	739 ^a	23,2
F _{ob, p}		23,4 ^{***}	0,3 ^{ns}	0,3 ^{ns}	1,1 ^{ns}	1,3 ^{ns}	6,2 ^{***}	3,5 ^{**}	0,6 ^{ns}	23,7 ^{***}	12,6 ^{***}	5,6 ^{***}	32,7 ^{***}	0,6 ^{ns}
Średnia		33,0	1,7	2,4	15,6	225	1393	2661	84,6	54,6	17,8	6,3	718	23,5
OSD		3,6	0,6	0,7	5,5	84,2	329	1871	5,7	28,3	2,9	1,5	81,5	8,1
WZ, %		11,0	36,0	29,8	35,2	37,5	23,6	70,3	6,8	51,8	16,3	24,0	11,4	34,4

Źródło: opracowanie własne. ***, **, * - istotność na poziomie 0,001; 0,01; 0,05; ns – brak istotnego działania czynnika; OSD – odchylenie standardowe; WZ – współczynnik zmienności; ^a – ta sama litera w rzędzie oznacza brak istotnego zróżnicowania cechy w kolumnie dla danego czynnika; SPAD – wskaźnik odczytu N-testera; N/S – indeks – wartość niemianowana.

4.5. Skład chemiczny pędu kukurydzy

4.5a. Doświadczenie nienawadniane

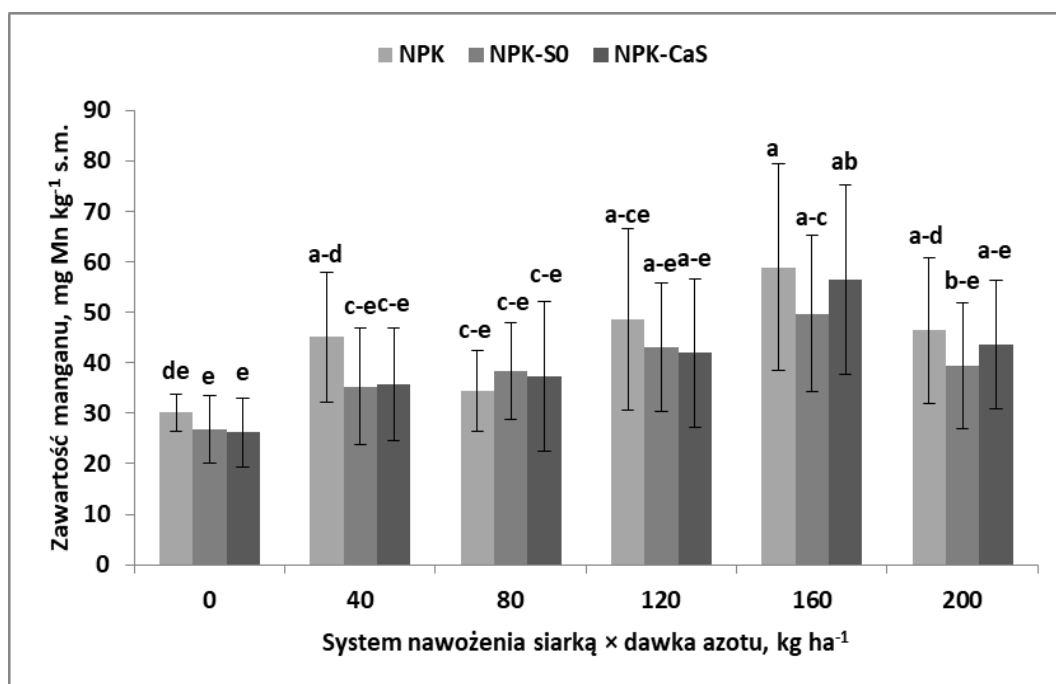
Zawartość składników pokarmowych w pędzie kukurydzy tylko dla dwóch pierwiastków, czyli Mn i Cu zależała od współdziałania Lata \times SYS \times ND. Zawartość N, P, Fe i Zn zależała od współdziałania Lata \times ND, a Ca od Lata \times SYS (zał. 4.9a). Zawartość K kształtowały lata i dawki azotu, lecz nie stwierdzono współdziałania między czynnikami (tab. 4.9). W odniesieniu do Lat, istotnie mniejszą zawartość tego składnika stwierdzono w 2020. W pozostałych latach była istotnie i to zdecydowanie większa (+77%). Wpływ dawek azotu ujawnił się głównie na kontroli N i kombinacji nawożonej 200 kg N ha⁻¹. Odnotowany wzrost zawartości składnika był niewielki, gdyż wyniósł zaledwie +12%. Zawartość Mg wykazała zmienność tylko w latach. W 2022 była prawie 2-krotnie większa niż w pozostałych (o 60% w 2020 i o 67% w 2021). Analiza współczynnika zmienności wskazała umiarkowany poziom zmienności dla Fe i Mn (< 35%). Dla pozostałych pierwiastków wartości tego wskaźnika by bardzo duże, przekraczając 100% dla Mg, Ca, a zwłaszcza Cu (181%) (tab. 4.9).

Plon ziarna kukurydzy wykazała istotny związek korelacyjny z sześcioma z 10 analizowanych składników pokarmowych, takimi jak N, K, Mg, Mn, Zn i Cu. (zał. 4.9b). Z przeprowadzonej analizy regresji krokowej wynika, że głównym predykatorem plonu ziarna był Mn. Uzyskane równanie przedstawia się następująco:

$$PLZ = 6,189 + 0,032Mn \text{ dla } n = 54, R^2 = 0,33 \text{ i } P \leq 0,001,$$

Z powyższego równania wynika, że zmienność plonu ziarna kukurydzy w 33% zależała od zmienności zawartości Mn w pędzie kukurydzy na początku stadium kwitnienia. Zawartość Mn w łodydze wykazała dość złożony przebieg w zależności od współdziałania SYS \times ND (ryc. 4.20). Wartość współczynnika zmienności dla systemów nawożenia siarką na tle dawek azotu była ogólnie mała, a największą, wynoszącą 14,3% odnotowano na kombinacji 40 kg N ha⁻¹. Dla pozostałych kombinacji nawozowych była mniejsza od 10%. Natomiast wartość WZ dla dawek azotu na tle systemów nawożenia siarką mieściła się w zakresie umiarkowanym, wahając się od 19,8% na obiekcie NPK-S0 do 24,9% na obiekcie NPK-CaS. Zawartość Mn na kontroli N była istotnie mniejsza, niż kombinacjach z N. Wahania między obiektami były nieznaczne, wykazując spadkowy trend na obiektach z siarką w stosunku do NPK (30,1 \geq 26,9 \geq 26,2 mg kg⁻¹ s.m.) systemów nawożenia siarką, odpowiednio NPK-S0 i NPK-CaS. Największą zawartość składnika odnotowano na

kombinacji 160 kg N ha⁻¹, na której zmniejszała się w kierunku NPK (58,9) ≥ NPK-CaS (56,4) ≥ NPK-S0 (49,8 mg kg⁻¹ s.m.). Trendy zawartości Mn, wynikające z działania dawek N wykazały zmienność dla poszczególnych obiektów nawozowych (zał. Z4.18). Zawartość Mn na obiekcie NPK wykazała przebieg liniowy, a więc wzrastała z każdą kolejną dawką N. Natomiast na obiektach z siarką najlepsze dopasowanie wyników uzyskano dla funkcji kwadratowej. Na obiekcie NPK-S0 maksymalną zawartość Mn, wynoszącą 44,9 mg kg⁻¹ s.m. odnotowano dla dawki 144,4 kg N ha⁻¹. Na obiekcie NPK-CaS, wartości te kształtowały się jak 60,3 mg kg⁻¹ s.m. i 178,6 kg N ha⁻¹.



Ryc. 4.20. Zawartość manganu w pędzie kukurydzy w reakcji na dawki azotu dla systemów nawożenia siarką – doświadczenie nienawadniane.

Źródło: opracowanie własne. ^ate same oznaczenia literowe oznaczają brak istotnych różnic między kolumnami; pionowy słupek w kolumnie określa wielkość standardowego błędu średniej.

Zawartość Mn w pędzie kukurydzy w stadium BBCH 61 wykazała, za wyjątkiem Ca, istotne związki korelacyjne z pozostałymi analizowanymi pierwiastkami (zał. 4.9b). Największą zależność odnotowano dla K. Wzrost zawartości tego składnika prowadził do wykładniczego wzrostu zawartości Mn. Otrzymana zależność przedstawia równanie:

$$Mn = 5,06^{0,14K} \text{ dla } n = 54, R^2 = 0,78, p \leq 0,01$$

Taki przebieg zależności wynika z faktu, że w latach 2021 i 2022, zawartość obu pierwiastków w łodydze kukurydzy była niecałe 2-krotnie większa dla K i około 3-krotnie dla Mn w stosunku do 2020.

Wysoce specyficzne zależności odnotowano dla zależności korelacyjnych Mn i Zn oraz Mn i Cu (ryc. Z4.19). Wzrost zawartości Mn wyznaczał wartość krytyczną dla obu tych pierwiastków. Wartość ta wyniosła 50 mg kg^{-1} s.m. dla Zn i 64 mg kg^{-1} s.m. dla Cu. Można więc stwierdzić, że poniżej tych krytycznych wartości oddziaływanie między parami tych pierwiastkami miało charakter synergistyczny a powyżej antagonistyczny.

Tabela 4.9. Zawartość składników pokarmowych w łodydze kukurydzy w stadium BBCH 61 – doświadczenie nienawadniane.

Czynnik	Poziom Czynnika	N	P	K	Na	Mg	Ca	Fe	Mn	Zn	Cu
		g kg ⁻¹ s.m.			mg kg ⁻¹ s.m.						
Lata (L)	2020	19,2 ^b	1,2 ^c	9,3 ^b	174 ^b	807 ^b	545 ^b	60,4 ^b	18,2 ^c	9,7 ^c	2,2 ^c
	2021	17,1 ^c	1,9 ^a	16,5 ^a	360 ^a	869 ^b	176 ^c	58,1 ^b	48,5 ^b	18,0 ^b	4,1 ^b
	2022	23,0 ^a	1,4 ^b	16,6 ^a	192 ^b	1349 ^a	1014 ^a	81,7 ^a	56,2 ^a	25,0 ^a	8,8 ^a
F _{ob, p}		231 ^{***}	73,3 ^{***}	263 ^{***}	118 ^{***}	114 ^{***}	53,5 ^{***}	54,4 ^{***}	186 ^{***}	327 ^{***}	1002 ^{***}
Systemy nawożenia siarką (SYS)	NPK	19,6	1,5	14,2	241	1066 ^a	690 ^a	70,3 ^a	43,9 ^a	17,3	5,1
	NPK-S ⁰	19,9	1,4	14,1	241	972 ^b	459 ^b	65,0 ^b	38,8 ^b	17,4	5,0
	NPK-CaSO ₄	19,9	1,5	14,1	243	987 ^{ab}	586 ^{ab}	64,9 ^b	40,2 ^{ab}	17,9	5,0
F _{ob, p}		0,8 ^{ns}	0,7 ^{ns}	0,1 ^{ns}	0,1 ^{ns}	0,1 ^{ns}	4,1 [*]	3,4 [*]	3,2 [*]	0,6 ^{ns}	0,7 ^{ns}
Dawki azotu (ND) kg N ha ⁻¹	0	17,9 ^d	1,4	13,2 ^b	241	885	509	67,4	27,7 ^c	15,1 ^b	4,4 ^b
	40	18,7 ^{cd}	1,4	13,9 ^{ab}	236	974	619	67,5	38,7 ^b	17,6 ^a	5,1 ^a
	80	19,8 ^{bc}	1,5	14,4 ^{ab}	245	1025	562	68,1	36,7 ^b	16,9 ^{ab}	5,0 ^{ab}
	120	20,4 ^{ab}	1,5	14,1 ^{ab}	241	1049	553	65,6	44,5 ^b	18,2 ^a	5,1 ^a
	160	20,8 ^{ab}	1,5	14,4 ^{ab}	235	1011	577	65,8	55,0 ^a	18,7 ^a	5,1 ^a
	200	20,9 ^a	1,6	14,8 ^a	254	1107	650	66,2	43,1 ^b	18,7 ^a	5,5 ^a
F _{ob, p}		18,8 ^{***}	1,4 ^{ns}	2,3 [*]	0,3 ^{ns}	0,3 ^{ns}	0,4 ^{ns}	0,2 ^{ns}	19,9 ^{***}	5,3 ^{***}	5,3 ^{***}
Średnia		19,3	27,6	22,4	127,2	377,4	213,1	59,2	42,9	28,7	23,1
OSD		19,2	22,1	21,2	92,4	480,8	294,7	16,2	14,8	27,8	41,8
WZ,%		99,5	80,0	94,7	72,6	127,4	138,3	27,4	34,4	96,6	181,2

Źródło: opracowanie własne. ***, **, * - istotność na poziomie 0,001; 0,01; 0,05; ns – brak istotnego działania czynnika; ^a – ta sama litera w rzędzie oznacza brak istotnego różnicowania cechy w kolumnie dla danego czynnika.

4.5b. Doświadczenie nawadnianie

Zawartość dwóch pierwiastków, czyli N i Mn w pędzie kukurydzy na początku kwitnienia (BBCH 61) zależała od współdziałania Lata \times SYS \times ND (zał. 4.10a). Natomiast zawartość Mg, Ca i Cu kształtowało współdziałanie Lata \times ND, a Fe i Zn współdziałanie Lata \times SYS. Zawartość Na wykazała zależność od czynników badawczych, lecz nie stwierdzono między nimi współdziałania. Zawartość tego składnika była największa w 2021 a istotnie mniejsza w pozostałych latach badań. Istotnie większą zawartość Na odnotowano na obiekcie NPK-CaS. Wzrost dawek N prowadził do wzrostu zawartości Na, lecz powyżej 120 kg N ha⁻¹ zaobserwowano istotny spadek. Wartości WZ dla analizowanych składników pokarmowych wahały się w bardzo szerokim zakresie od 13,3% (mała zmienność) dla N do 87,1% (bardzo duża zmienność) dla Ca (tab. 4.10). Wartość omawianego współczynnika dla K i Fe mieściła się w zakresie umiarkowanym, a dla pozostałych – dużym.

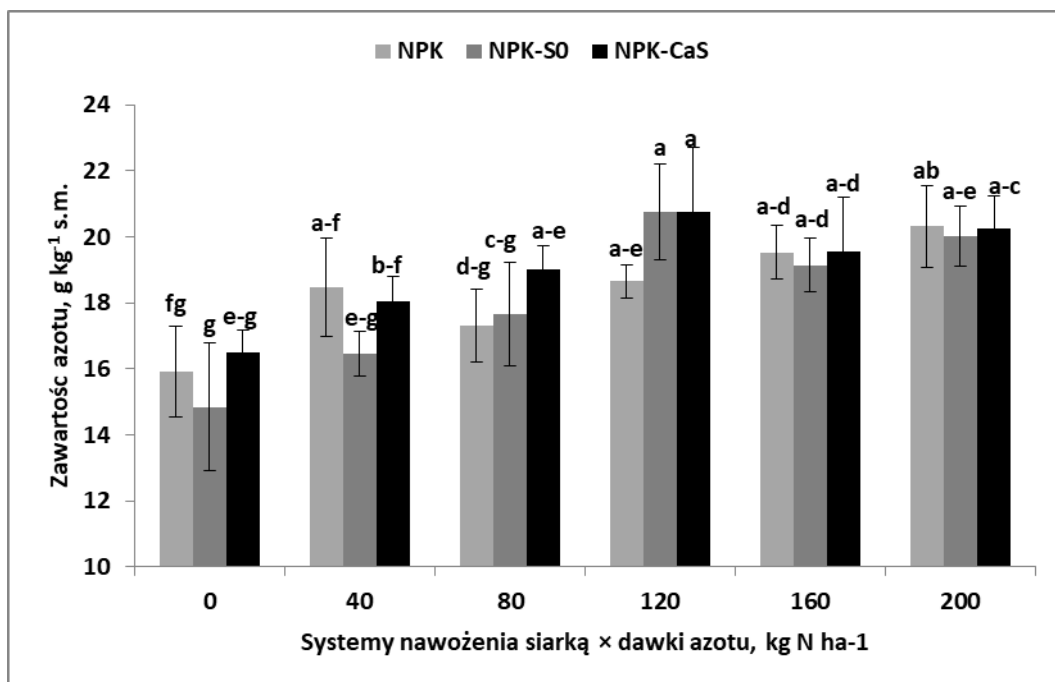
Plon ziarna kukurydzy wykazał istotny związek korelacyjny z siedmioma z 10 analizowanych składników pokarmowych. Nie odnotowano istotnej zależności dla P, Fe i Zn (zał. 4.10b). Z przeprowadzonej analizy regresji krokowej wynika, że pierwiastkami diagnostycznymi plonu ziarna były N i Cu. Otrzymane równanie przedstawia się następująco:

$$PLZ = 2,654 + 0,27N + 0,44Cu \text{ dla } n = 54, R^2 = 0,56, p \leq 0,001$$

Z powyższego równania wynika, że zawartość obu tych pierwiastków umożliwiła prognozę plonu ziarna kukurydzy na poziomie tylko nieco mniejszym od 60%. Wartości WZ dla systemów nawożenia siarką na tle dawek azotu były bardzo małe, a największą zmienność, wynoszącą 6% odnotowania na kombinacjach 40 i 120 kg N ha⁻¹. Dla kombinacji z największymi dawkami N wartości WZ były ekstremalnie małe (< 1,2%). Wartość omawianego współczynnika dla dawek azotu na tle systemów nawożenia siarką mieściła się na niskim poziomie, wahając się od 12,4% na obiekcie NPK-S0 do nieco ponad 8% na pozostałych obiektach.

Zawartość N w łodydze wzrastała wraz z dawkami N, osiągając maksymalne wartości, zależnie od systemu nawożenia siarką (ryc. 4.21). Największą zawartość N na NPK stwierdzono na kombinacji 200 kg N ha⁻¹, aczkolwiek kształtowała się na takim samym poziomie, jak na kombinacjach 120 i 160 kg N ha⁻¹. Natomiast na obiektach z siarką istotnie największą zawartość składnika odnotowano na kombinacji 120 kg N ha⁻¹. Trendy zawartości N dla dawek N na tle systemów nawożenia siarką także

kształtowały się odmiennie. Na obiekcie NPK trend ten miał charakter liniowy, a więc zawartość N wzrastała w miarę wzrostu dawek N (ryc. Z4.20). Natomiast na obiektach z siarką trend ten najlepiej opisuje funkcja kwadratowa. Na NPK-S0 maksymalną zawartość N, wynosząca $19,9 \text{ g N kg}^{-1} \text{ s.m.}$ odnotowano dla $N_{\text{opt}} = 176,5 \text{ kg ha}^{-1}$. Na NPK-CaS obie wartości kardynalne kształtowały się, jak $20,3 \text{ g N kg}^{-1} \text{ s.m.}$ i 162 kg N ha^{-1} . Zawartość N, co jest wysoce specyficzne, była istotnie, lecz ujemnie skorelowana z P, Fe, Zn i Na. Zawartość Na wykazała istotną, lecz słabą i ujemną korelację z N.



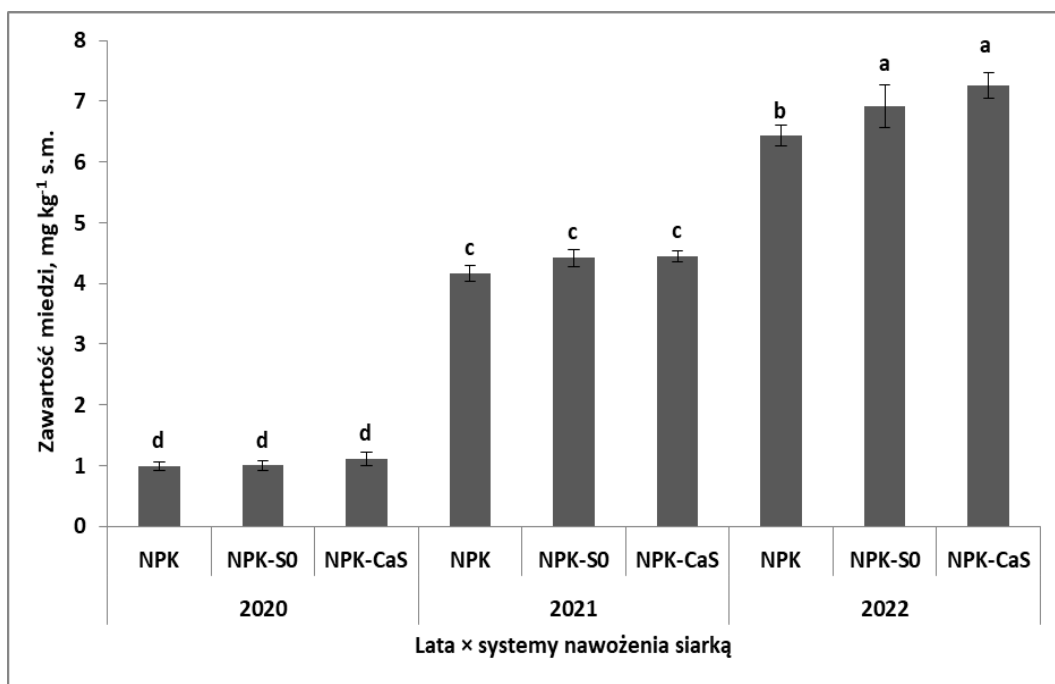
Ryc. 4.21. Zawartość azotu w pędzie kukurydzy w reakcji na dawki azotu dla systemów nawożenia siarką – doświadczenie nawadniane.

Źródło: opracowanie własne. ^ate same oznaczenia literowe oznaczają brak istotnych różnic między kolumnami; pionowy słupek w kolumnie określa wielkość standardowego błędu średniej.

Zawartość Cu w pędzie kukurydzy zależała od współdziałania Lata × SYS (ryc. 4.22). W istocie rzeczy głównym czynnikiem zmiany zawartości tego pierwiastka były lata. W 2021 zawartość składnika w porównaniu z 2020 zwiększyła się ponad 4-krotnie, a w 2022 6(7)-krotnie. Tylko w 2022 odnotowano działanie systemów nawożenia siarką. Istotnie większą zawartość Cu stwierdzono na obiektach z siarką. Zawartość Cu, za wyjątkiem N i Na, była istotnie i dodatnio skorelowana z pozostałymi składnikami pokarmowymi. Największe wartości współczynnika korelacji odnotowano dla K i Mg ($> 0,9^{***}$). Zawartość Cu w stosunku do zawartości K wzrastała wykładniczo a w stosunku do zawartości Mg zgodnie z funkcją kwadratową. Jednakże z analizy krokowej wynika, że głównymi determinantami zawartości Cu były K i Ca. Otrzymaną zależność przedstawia równanie:

$$Cu = -3,05 + 0,42K + 0,002Ca \text{ dla } n = 54, R^2 = 0,94 \text{ i } p \leq 0,001$$

Oba te pierwiastki wyjaśniają w 94% zmienność zawartości Cu w łodydze kukurydzy. Taki przebieg uzyskanej zależności wynikał z działania lat. Zawartość K w latach 2021 i 2021 była 2-krotnie większa, niż w 2020. Natomiast zawartość Ca w 2022 w stosunku do lat poprzednich była (średnio) 5-krotnie większa.



Ryc. 4.22. Zawartość miedzi w pędzie kukurydzy w kolejnych latach badań na tle systemów nawożenia siarką – doświadczenie nawadniane.

Źródło: opracowanie własne. ^ate same oznaczenia literowe oznaczają brak istotnych różnic między kolumnami; pionowy słupek w kolumnie określa wielkość standardowego błędu średniej.

Tabela 4.10. Zawartość składników pokarmowych w łodydze kukurydzy w stadium BBCH 61 – doświadczenie nawadniane.

Czynnik	Poziom Czynnika	N	P	K	Na	Mg	Ca	Fe	Mn	Zn	Cu
		g kg ⁻¹ s.m.			mg kg ⁻¹ s.m.						
Lata (L)	2020	19,6 ^a	1,3 ^c	8,7 ^c	148 ^b	614 ^c	330 ^b	45,7 ^c	9,6 ^b	7,0 ^c	1,0 ^c
	2021	16,7 ^b	2,9 ^a	16,6 ^b	252 ^a	940 ^b	269 ^b	74,2 ^a	52,3 ^a	20,8 ^a	4,3 ^b
	2022	19,2 ^a	1,7 ^b	17,4 ^a	133 ^b	1645 ^a	1497 ^a	66,4 ^b	47,9 ^a	16,1 ^b	6,9 ^a
	F _{ob, p}	50,7***	602***	467***	119***	595***	446***	95,1***	272***	221***	924***
Systemy nawożenia siarką (SYS)	NPK	18,4 ^{ab}	2,0	14,2	175 ^{ab}	1133 ^a	823 ^a	64,5	36,5	15,2	4,1
	NPK-S ⁰	18,1 ^b	1,9	14,2	168 ^b	1059 ^b	628 ^b	60,8	37,7	13,9	3,9
	NPK-CaSO ₄	19,0 ^a	2,0	14,2	190 ^a	1007 ^b	645 ^b	61,0	35,5	14,8	4,2
	F _{ob, p}	4,3*	0,2 ^{ns}	0,1 ^{ns}	3,4*	8,5***	10,9***	1,9 ^{ns}	0,6 ^{ns}	1,8 ^{ns}	1,5 ^{ns}
Dawki azotu (ND) kg N ha ⁻¹	0	15,8 ^c	2,0	13,5	166 ^{ab}	1010	704	59,9	27,0 ^c	13,5	3,7 ^b
	40	17,7 ^b	2,0	14,7	198 ^a	1125	775	63,0	36,7 ^{ab}	14,2	3,9 ^{ab}
	80	18,0 ^b	2,0	14,1	168 ^{ab}	1092	768	64,2	33,6 ^{bc}	14,0	4,2 ^{ab}
	120	20,1 ^a	2,0	14,5	195 ^{ab}	1058	607	62,2	40,9 ^{ab}	15,3	4,3 ^a
	160	19,4 ^a	1,9	14,4	177 ^{ab}	1045	676	61,6	39,0 ^{ab}	15,3	4,1 ^{ab}
	200	20,2 ^a	1,9	14,0	162 ^b	1067	663	61,6	42,2 ^a	15,6	4,3 ^a
	F _{ob, p}	30,8***	0,65 ^{ns}	2,0 ^{ns}	3,4**	1,7 ^{ns}	2,0 ^{ns}	0,5 ^{ns}	7,8***	1,6 ^{ns}	3,1**
Średnia		18,5	2,0	14,2	177,7	1066,3	698,8	62,1	36,6	14,6	4,1
OSD		2,5	0,7	4,1	61,8	451,8	608,8	13,8	21,5	6,2	2,5
WZ,%		13,3	36,7	28,6	34,7	42,4	87,1	22,2	58,7	42,3	60,1

Źródło: opracowanie własne. ***, **, * - istotność na poziomie 0,001; 0,01; 0,05; ns – brak istotnego działania czynnika; ^a – ta sama litera w rzędzie oznacza brak istotnego zróżnicowania cechy w kolumnie dla danego czynnika.

4.6. Ziarno

4.6a. Doświadczenie nienawadniane

Wpływ współdziałania Lata \times SYS \times ND na zawartość pierwiastków w ziarnie kukurydzy odnotowano tylko dla dwóch spośród 10 analizowanych, a mianowicie Mg i Na (zał. 4.11a.). Zawartość Ca zależała od współdziałania Lata \times ND i Lata \times SYS, a N od współdziałania Lata \times ND. Pozostałych sześć pierwiastków wykazało zmienność w latach, a dla Mg i Ca odnotowano także istotną reakcję na systemy nawożenia siarką. Zawartość P w ziarnie była istotnie najmniejsza w 2022 a istotnie większa, średnio o 50% w pozostałych latach badań. Dwa pierwiastki, to znaczy K i Zn wykazały podobny trend w latach, uzyskując największą zawartość w 2002, a istotnie mniejszą w pierwszych dwóch latach prowadzenia badań. Zawartość Cu w 2020 była istotnie mniejsza niż pozostałych latach. Zawartość Fe i Mn była najmniejsza w 2021, a zmienna w pozostałych latach. Współczynnik zmienności (WZ) dla N oraz Zn w ziarnie był na niskim poziomie ($< 15\%$). Wartości WZ dla P, K, Na, Mg, Fe, Mn, oraz Cu kształtowały się na poziomie średnim (15-35%). Największa zmienność wynosząca aż 56,6 % odnotowano dla wapnia (tab. 4.11).

Z 10 analizowanych pierwiastków, aż sześć istotnie wpływało na plon ziarna (zał. 4.11b). Spośród tej grupy, tylko Mg i P wykazały ujemny a Ca, Mn, Zn i Cu dodatni związek korelacyjny z plonem. Na podstawie analizy regresji krokowej stwierdzono istotny związek tylko dla Mn. Zależność tą wyraża równanie:

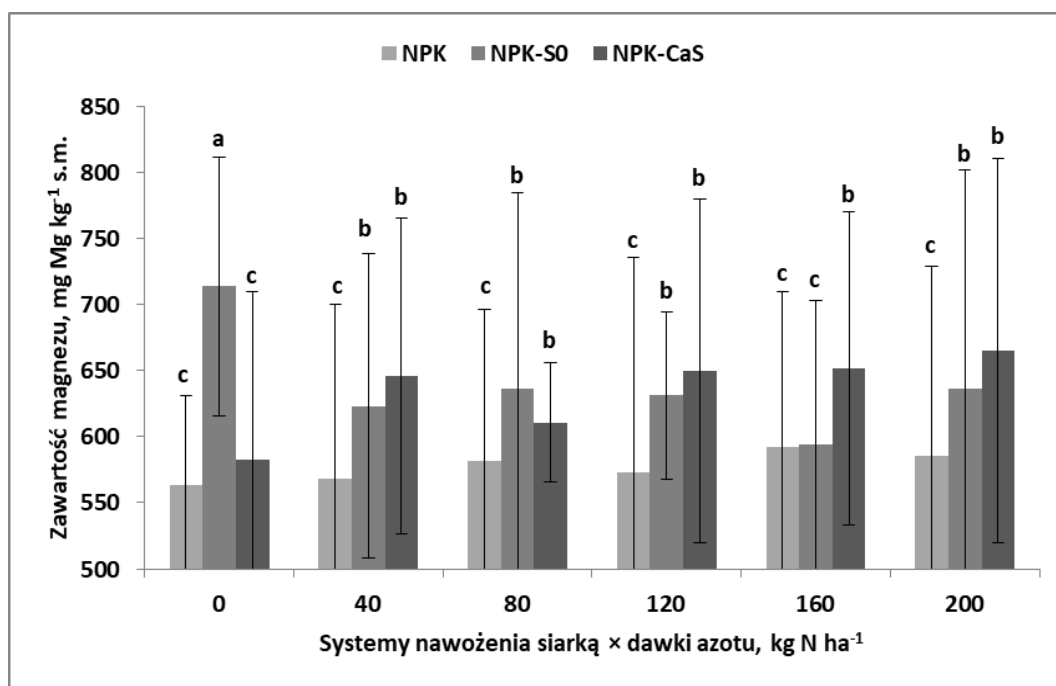
$$PLZ = 3,69 + 0,75Mn \text{ dla } n = 54, R^2 = 0,29 \text{ i } p \leq 0,05$$

Z powyższego równania wynika że zmienność plonu w 29 % wynikała ze zmienności zawartości Mn w ziarnie. Głównym czynnikiem zmienności były lata a istotnie mniejszą zawartość odnotowano w 2020. Zawartość Mn była ujemnie skorelowana z P i Mg a dodatnio z Na, K i Ca. Z wykonanej analizy regresji krokowej wynika, że zawartość Mn była istotnie kształtowana przez zawartość K, Mg i Fe:

$$Mn = 2,42 + 0,57K - 0,004Mg + 0,16Fe \text{ dla } n = 54, R^2 = 0,65 \text{ i } p \leq 0,001$$

Spośród tych trzech pierwiastków, tylko zawartość Mg zależała od współdziałania Lata \times SYS \times ND (ryc. 4.23). Ogólnie największe różnice między obiektami z siarką wystąpiły na kontroli N. Dominacja NPK-S0 zaznaczyła się tylko na tej kombinacji i nawożonej 40 kg N ha⁻¹. Na pozostałych większe wartości omawianej cechy notowano na NPK-CaS. Zmienność zawartości omawianego składnika w zależności od systemów

nawożenia siarką na tle dawek była ogólnie mała i poza kontrolą N nie przekraczała 10%. Zmienność zawartości Mg dla dawek N na tle systemów nawożenia siarką była też bardzo mała. Na obiekcie NPK nie przekroczyła 2%, a na nawożonych siarką maksymalnie osiągnęła 6,2% (NPK-CaS).

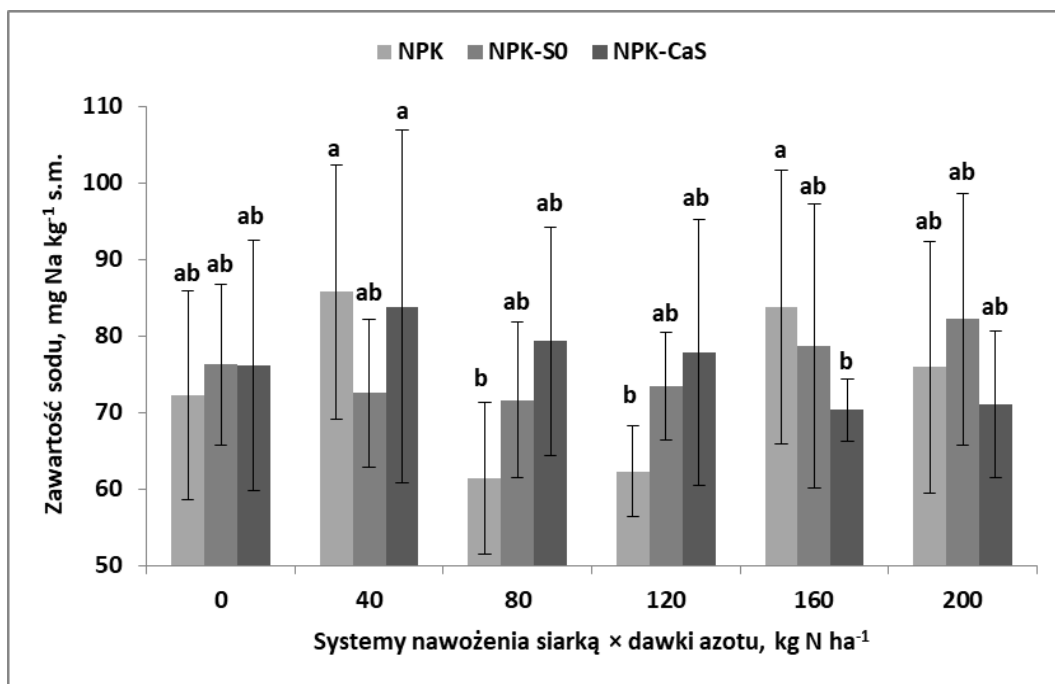


Ryc. 4.23. Zawartość magnezu w ziarnie kukurydzy w reakcji na systemy nawożenia siarką i dawek azotu – doświadczenie nienawadniane.

Źródło: opracowanie własne. ^ate same oznaczenia literowe oznaczają brak istotnych różnic między kolumnami; pionowy słupek w kolumnie określa wielkość standardowego błędu średniej.

Trend zawartości Mg na obiekcie NPK-S0 w reakcji na wzrastających dawek azotu najlepiej opisuje funkcja kwadratowa (ryc. Z4.21). Wzrost dawki N do 138 kg N ha⁻¹ prowadził do spadku zawartości Mg z 701 mg kg⁻¹ s.m. do 605 mg kg⁻¹ s.m.. Na pozostałych obiektach zawartość Mg wzrastała liniowo wraz z dawką N. Większą dynamikę wzrostu notowano dla NPK-CaS. Współczynnik kierunkowy prostej na tym obiekcie był 3-krotnie większy, niż na NPK.

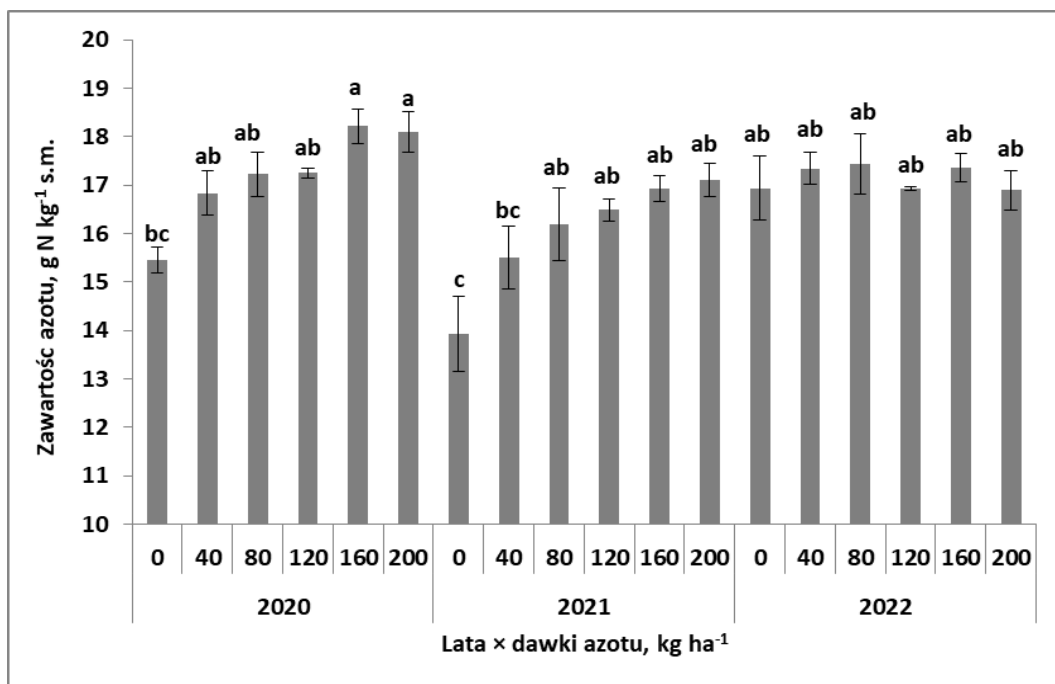
Zawartość Na była istotnie mniejsza w 2020 w porównaniu do pozostałych lat (ryc. 4.24). Na obiekcie NPK i NPK-S0 odnotowano specyficzną sytuację na kombinacjach 80 i 120 kg N ha⁻¹. Odnotowano spadek zawartości omawianego składnika w stosunku do kombinacji z niższymi i wyższymi dawkami azotu. Natomiast na obiekcie NPK-CaS odnotowano trend spadkowy zawartości Na powyżej dawki 40 kg N ha⁻¹. Zawartość Na w ziarnie wykazała bardzo małą zmienność między systemami nawożenia siarką. Maksymalne wartości WZ na kombinacjach 80 i 120 kg N ha⁻¹ nie przekraczały 15%.



Ryc. 4.24. Zawartość sodu w ziarnie kukurydzy w reakcji na współdziałanie systemów nawożenia siarką i dawek azotu - doświadczenie nienawadniane.

Źródło: opracowanie własne. ^ate same oznaczenia literowe oznaczają brak istotnych różnic między kolumnami; pionowy słupek w kolumnie określa wielkość standardowego błędu średniej.

Zawartość N w ziarnie zależała od współdziałania Lata × ND (ryc. 4.25). Największe różnice w latach odnotowano na kontroli N, na której zawartość składnika wzrastała w kierunku 2021 < 2020 < 2022. Wartości WZ w latach na tle dawek N były bardzo małe i zmniejszały się znacznie pod wpływem nawożenia tym składnikiem (9,8% na kontroli N → 3,7% na kombinacji 200 kg N ha⁻¹). Wartości WZ dla dawek N na tle lat także była ekstremalnie małe (< 10%), zwłaszcza w 2022 (1,5%). Trendy zawartości N w reakcji na dawki składnika były zmienne w latach. Tylko w 2020 odnotowano wzrost liniowy, zgodny z dawkami N (ryc. Z4.22). W 2021 trend ten najlepiej opisuje funkcja kwadratowa. Największa zawartość N w ziarnie wyniosła 17,1 g kg⁻¹ s.m. i została uzyskana dla N_{opt} = 182 kg N ha⁻¹. W 2022 zawartość N w ziarnie była wysoka i niezależna od dawek N.



Ryc. 4.25. Zawartość azotu w ziarnie kukurydzy w reakcji na współdziałanie lat i dawek azotu - doświadczenie nienawadniane.

Źródło: opracowanie własne. ^ate same oznaczenia literowe oznaczają brak istotnych różnic między kolumnami; pionowy słupek w kolumnie określa wielkość standardowego błędu średniej.

Analiza zawartości składników pokarmowych w ziarnie kukurydzy na tle zakresów standardowych (*Benton Jones, 2003*) wykazała zgodność każdym roku prowadzonych badań tylko dla N i Cu. Zawartość P była poniżej normy w 2022. Dla K w 2022 odnotowano zawartość powyżej zakresu standardowego. Zawartość Mg w ziarnie we wszystkich latach badań kształtowała się poniżej normy, lecz w 2022 była mocno zbliżona do dolnej wartości zakresu. Dla Ca odnotowano taką samą zależność jak dla Mg. W 2022 zawartość tego składnika była tylko nieznacznie poniżej dolnej wartości zakresu optymalnego. Zawartość Fe i Mn we wszystkich latach badań była poniżej dolnej wartości zakresu optymalnego.

Tabela 4.11. Zawartość składników pokarmowych w ziarnie kukurydzy – doświadczenie nienawadniane.

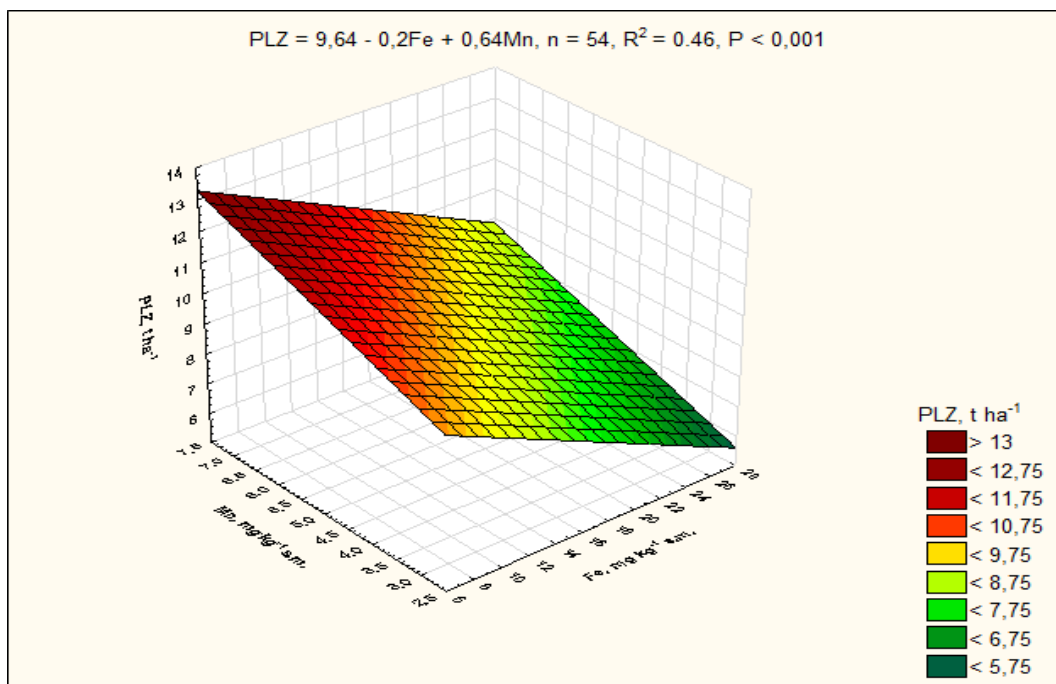
Czynnik	Poziom Czynnika	g kg ⁻¹ s.m.					mg kg ⁻¹ s.m.				
		N	P	K	Na	Mg	Ca	Fe	Mn	Zn	Cu
Lata (L)	2020	17,2 ^a	2,5 ^a	3,2 ^b	52,8 ^b	842 ^a	25,8 ^c	19,3 ^b	4,1 ^b	14,8 ^b	1,3 ^a
	2021	16,0 ^b	2,4 ^b	2,9 ^b	87,9 ^a	533 ^b	50,2 ^b	21,3 ^a	5,5 ^a	14,1 ^b	2,1 ^b
	2022	17,2 ^a	1,6 ^c	4,4 ^a	85,0 ^a	476 ^c	87,6 ^a	14,8 ^c	5,6 ^a	16,9 ^a	2,1 ^b
F _{ob, p}		13,2 ^{***}	92,0 ^{***}	38,1 ^{***}	46,0 ^{***}	207 ^{***}	108 ^{***}	53,8 ^{***}	51,9 ^{***}	11,6 ^{***}	81,3 ^{***}
Systemy nawożenia siarką (SYS)	NPK	16,3 ^b	2,1	3,3	73,6	577 ^b	49,2 ^b	18,5	5,1	15,6	1,9 ^a
	NPK-S ⁰	17,1 ^a	2,2	3,7	75,8	639 ^a	51,0 ^b	18,8	5,0	15,2	1,9 ^a
	NPK-CaSO ₄	17,0 ^a	2,2	3,4	76,4	634 ^a	63,4 ^a	18,1	5,1	15,0	1,7 ^b
F _{ob, p}		6,2 ^{**}	0,8 ^{ns}	2,9 ^{ns}	0,3 ^{ns}	6,3 ^{**}	6,7 ^{**}	0,7 ^{ns}	0,2 ^{ns}	0,6 ^{ns}	6,2 ^{**}
Dawki azotu (ND) kg N ha ⁻¹	0	15,4 ^b	2,2	3,6	74,9	620	55,0	17,1	4,8	14,6	1,8
	40	16,6 ^a	2,1	3,4	80,7	612	63,7	18,4	5,0	15,8	1,8
	80	17,0 ^a	2,2	3,4	70,7	610	53,5	19,0	4,9	14,7	1,8
	120	16,9 ^a	2,2	3,4	71,2	618	50,2	19,1	5,3	15,2	1,9
	160	17,5 ^a	2,2	3,6	77,6	612	57,1	18,9	5,3	15,2	1,9
	200	17,4 ^a	2,1	3,5	76,4	629	47,8	18,4	5,1	16,2	1,9
F _{ob, p}		8,4 ^{***}	0,7 ^{ns}	0,3 ^{ns}	0,9 ^{ns}	0,1 ^{ns}	1,7 ^{ns}	1,4 ^{ns}	1,8 ^{ns}	1,0 ^{ns}	0,5 ^{ns}
Średnia		16,8	2,2	3,5	75,2	616,9	54,6	18,5	5,1	15,3	1,8
OSD		1,2	0,4	0,8	21,2	178,8	30,9	3,3	0,8	2,2	0,4
WZ, %		7,1	19,0	23,6	28,2	29,0	56,6	17,7	16,6	14,1	22,5

Źródło: opracowanie własne. ***, **, * - istotność na poziomie 0,001; 0,01; 0,05; ns – brak istotnego działania czynnika; OSD – odchylenie standardowe; WZ – współczynnik zmienności; ^a – ta sama litera w rzędzie oznacza brak istotnego zróżnicowania cechy w kolumnie dla danego czynnika.

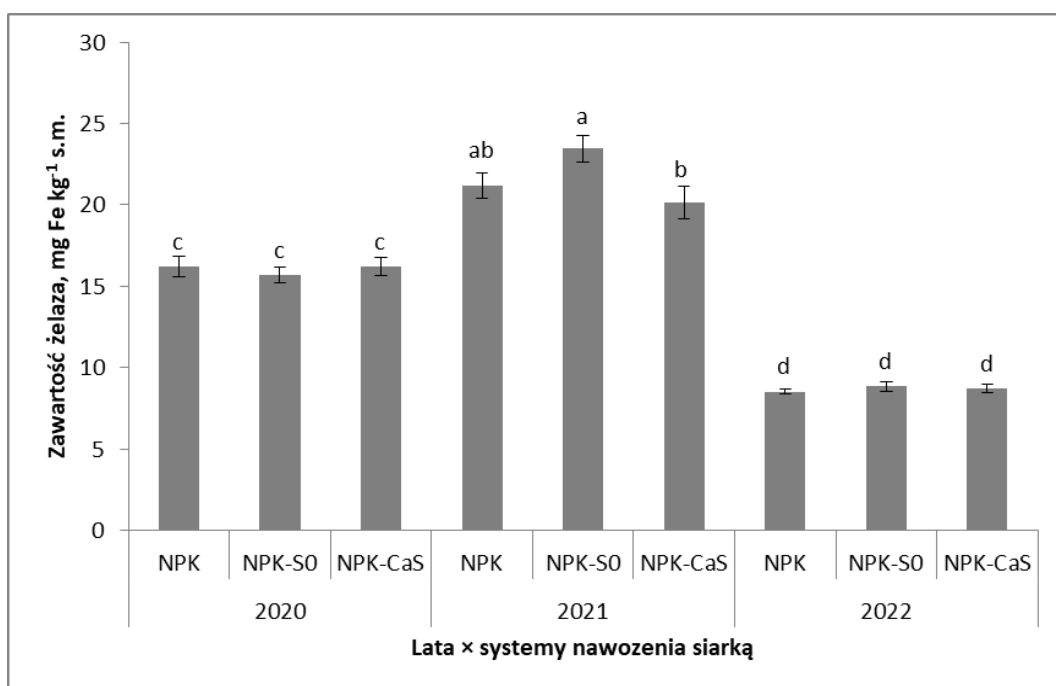
4.6b. Doświadczenie nawadnianie

Istotny wpływ współdziałania Lata \times SYS \times ND na zawartość składników pokarmowych w ziarnie odnotowano tylko dla Na i Ca (zał. 4.12a). Poza tymi pierwiastkami, zawartość Zn wykazała reakcję na współdziałanie Lata \times ND, a Fe na Lata \times SYS. Zawartość pozostałych pierwiastków zależała głównie od lat. Taką prawidłowość odnotowano dla P i Mg, które wykazały istotnie mniejsze wartości w 2022. Zawartość N, Zn, a także Cu zależała od lat i czynników doświadczalnych, lecz nie stwierdzono między nimi współdziałania. Zawartość N była istotnie mniejsza w 2021 a największa w 2020. Odnotowano istotny, aczkolwiek niewielki wzrost zawartości składnika na NPK-CaS w stosunku do NPK-S0. Reakcja omawianej cechy na nawożenie N zachodziła progresywnie w całym zakresie dawek. Trendy zawartości Zn i Cu w latach były odmienne a największe wartości odnotowano w 2021. Nawożenie S⁰ istotnie zwiększyło zawartość obu składników w stosunku do NPK, jak i NPK-CaS. Wzrost dawek N prowadził, zwłaszcza dla większych dawek składnika, do istotnego wzrostu zawartości obu pierwiastków w ziarnie. Współczynnik zmienności (WZ) dla N i Mg kształtował się na niskim poziomie. Zmienność na średnim poziomie wykazały K, Mn, Zn i Cu. Największą zmienność, lecz tylko nieznacznie powyżej 35%, odnotowano dla P, Na, Ca oraz Fe (tab. 4.12).

Istotne związki korelacyjne z plonem ziarna odnotowano dla siedmiu z 10 pierwiastków, lecz w większości, za wyjątkiem K, były to zależności ujemne. Z przeprowadzonej analizy regresji krokowej wynika, że PLZ w największym stopniu zależał od współdziałania Fe i Mn (ryc. 4.26). Istotą współdziałania obu tych pierwiastków jest wzrost plonu ziarna przy spadku zawartości Fe i jednoczesnym wzroście zawartości Mn. Zawartość Fe wykazała istotny związek korelacyjny ze wszystkimi analizowanymi pierwiastkami, za wyjątkiem K i Ca. Największe związki korelacyjne odnotowano z P, Na, Zn. Natomiast zawartość Mn wykazała istotne związki korelacyjne ze wszystkimi analizowanymi pierwiastkami, za wyjątkiem Na, Mg. Największe wartości odnotowano dla K.



Ryc. 4. 26. Plon ziarna jako wynik współdziałania zawartości żelaza i manganu w ziarnie – doświadczenie nawadniane.
 Źródło: opracowanie własne

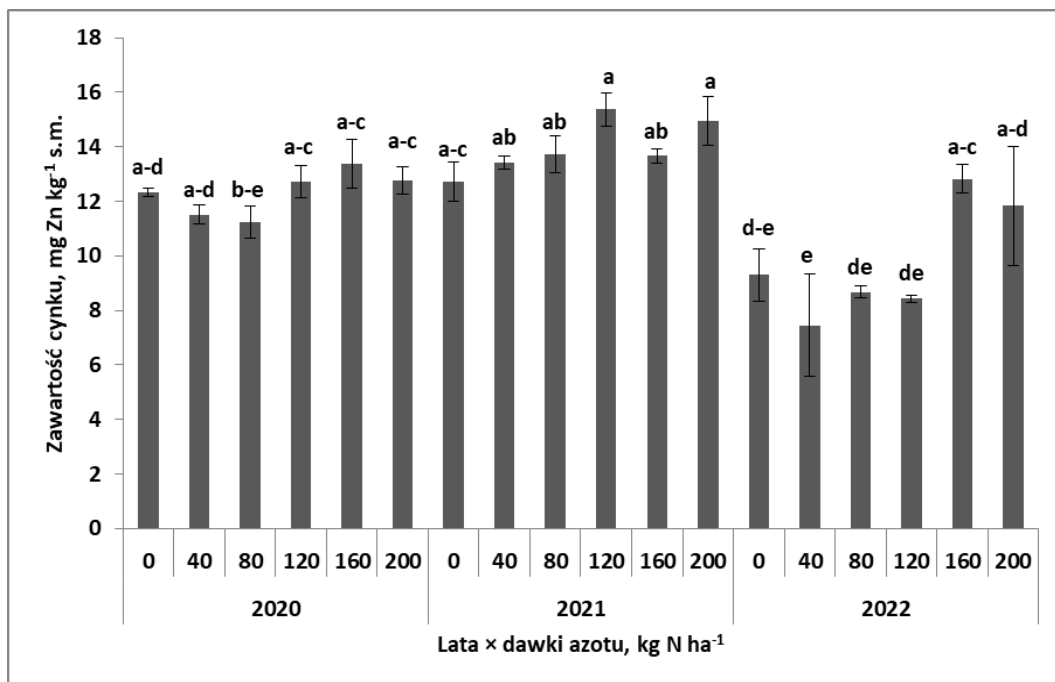


Ryc. 4. 27. Zawartość żelaza w ziarnie kukurydzy jako funkcja współdziałania lat i systemów nawożenia siarką – doświadczenie nawadniane.
 Źródło: opracowanie własne. ^ate same oznaczenia literowe oznaczają brak istotnych różnic między kolumnami; pionowy słupek w kolumnie określa wielkość standardowego błęd średniej.

Zawartość Fe wykazała istotną zależność od współdziałania Lata × SYS (ryc. 4.27). Największe wartości odnotowano w 2021, a więc w roku, w którym plony były najmniejsze. Do tego największe wartości omawianej cechy odnotowano dla NPK-S0, a

istotnie mniejsze dla NPK-CaS. W 2022 zawartość składnika była najmniejsza i nie odnotowano wpływu stosowania siarki. W 2020 zawartość Fe kształtowała się na pośrednim poziomie i także nie odnotowano działania siarki. Zawartość Fe wykazała, jak wynika z analizy regresji krokowej, istotny związek z zawartością P, K i Zn:

$$Fe = 2,1 + 4,84P - 1,24K + 0,52Zn \text{ dla } n = 54, R^2 = 0,90, p \leq 0,001$$



Ryc. 4. 28. Zawartość cynku w ziarnie kukurydzy jako efekt współdziałania lat i dawek azotu – doświadczenie nawadniane.

Źródło: opracowanie własne. ^ate same oznaczenia literowe oznaczają brak istotnych różnic między kolumnami; pionowy słupek w kolumnie określa wielkość standardowego błęd średniej.

Tylko Zn z tej grupy pierwiastków wykazał zależność od współdziałania Lata × ND (ryc. 4.28). W 2020 i 2021 zawartość Zn w ziarnie wykazała zmienną, specyficzną reakcję na dawki N. W obu latach, w stosunku do kontroli N, odnotowano trend wzrostowy na kombinacji 120 kg N ha⁻¹, a w 2021 także na 200 kg N ha⁻¹. W 2022 odnotowano istotnie mniejsze wartości omawianej cechy. Zawartość Zn na kontroli N była większa w porównaniu do kombinacji 40, 80, 120 kg N ha⁻¹. Wzrost zawartości tego pierwiastka, analogicznie, jak w poprzednich latach, odnotowano na kombinacjach z największymi dawkami N. Zawartość Zn w ziarnie wykazała istotny, dodatni związek korelacyjny z sześcioma pierwiastkami, lecz ujemny z plonem ziarna. Nie odnotowano istotnych związków z N, P i Ca (zał. 4.12b).

Drugi z kluczowych determinantów plonu, czyli zawartość Mn, istotnie zależała od zawartości K i Zn (ryc. Z.4.23). Oba te pierwiastki, jak wynika z wartości

współczynnika determinacji ($R^2 = 0,71$) istotnie kształtowały zawartość Mn. Największą zawartość Mn warunkował wzrost zawartości obu tych pierwiastków. Natomiast ujemne związki korelacyjne odnotowano dla związków z N, a także Ca,

Analiza zawartości składników pokarmowych w ziarnie kukurydzy na tle zakresów optymalnych (*zał. 5.1; Benton Jones, 2003*) wykazała, że zawartość N i Cu we wszystkich latach badań mieściła się w zakresach standardowych. Zawartość P w 2022 była poniżej zakresu dla tego pierwiastka. Zawartość K w latach 2021 i 2022 mieściła się w zakresie optymalnym. Dla Mg we wszystkich latach badań odnotowano wyniki poniżej dolnej wartości zakresu. Zawartość Ca tylko w 2020 mieściła się poniżej zakresu. Natomiast zawartość Fe w żadnym z lat nie znajdowała się w zakresie optymalnym. Zawartość Mn w ziarnie kukurydzy tylko w 2021 znajdowała się w zakresie optymalnym.

Tabela 4.12. Zawartość składników pokarmowych ziarnie kukurydzy – doświadczenie nawadniane.

Czynnik	Poziom Czynnika	N	P	K	Na	Mg	Ca	Fe	Mn	Zn	Cu
		g kg ⁻¹ s.m.			mg kg ⁻¹ s.m.						
Lata (L)	2020	16,6 ^a	2,3 ^b	2,8 ^b	96,6 ^b	686 ^a	25 ^b	16,0 ^b	3,3 ^c	12,3 ^b	1,3 ^c
	2021	12,9 ^c	3,7 ^a	4,8 ^a	128,6 ^a	674 ^a	159 ^a	21,6 ^a	5,6 ^a	14,0 ^a	2,1 ^a
	2022	15,1 ^b	1,7 ^c	5,0 ^a	61,3 ^c	557 ^b	148 ^a	8,7 ^c	4,7 ^b	9,8 ^c	1,5 ^b
F _{ob, p}		291***	581***	158***	146***	23,8***	400***	398***	112***	42,1***	66,3***
Systemy nawożenia siarką (SYS)	NPK	14,8 ^{ab}	2,6	4,2	92,7 ^b	642	122 ^a	15,3	4,4	11,4 ^b	1,6 ^{ab}
	NPK-S ⁰	14,7 ^b	2,5	4,2	105,4 ^a	631	104 ^b	16,0	4,5	12,6 ^a	1,7 ^a
	NPK-CaSO ₄	15,0 ^a	2,6	4,2	88,4 ^b	645	104 ^b	15,0	4,6	12,1 ^{ab}	1,5 ^b
F _{ob, p}		3,3*	0,8 ^{ns}	0,21 ^{ns}	10,1***	0,26 ^{ns}	8,1***	2,5 ^{ns}	1,3 ^{ns}	3,6*	3,8***
Dawki azotu (ND) kg N ha ⁻¹	0	13,6 ^d	2,6	4,3 ^{ab}	101,8 ^a	638	120	14,9	4,1 ^c	11,4 ^{bc}	1,6 ^{ab}
	40	14,0 ^d	2,6	4,0 ^b	93,3 ^a	620	112	14,8	4,2 ^{bc}	10,8 ^c	1,4 ^b
	80	14,7 ^c	2,5	4,0 ^b	86,2 ^a	606	108	15,3	4,2 ^{bc}	11,2 ^{bc}	1,5 ^b
	120	15,1 ^{bc}	2,6	4,3 ^{ab}	91,5 ^a	657	100	15,1	5,0 ^a	12,2 ^b	1,7 ^{ab}
	160	15,6 ^{ab}	2,6	4,1 ^{ab}	100,0 ^a	662	114	16,4	4,9 ^{ab}	13,3 ^a	1,8 ^a
	200	16,0 ^a	2,5	4,6 ^a	100,2 ^a	652	108	16,1	4,8 ^{ab}	13,2 ^a	1,6 ^{ab}
F _{ob, p}		36,0***	0,8 ^{ns}	2,8*	2,4*	1,15 ^{ns}	1,7 ^{ns}	2,0 ^{ns}	5,6***	5,1***	3,6**
Średnia		14,8	2,5	4,2	95,5	639,3	110,2	15,4	4,5	12,0	1,6
OSD		1,8	0,9	1,1	33,8	85,7	68,3	5,6	1,1	2,5	0,4
WZ, %		12,2	35,2	25,6	35,4	13,4	62,0	36,2	24,8	21,0	27,3

Źródło: opracowanie własne. ***, **, * - istotność na poziomie 0,001; 0,01; 0,05; ns – brak istotnego działania czynnika; OSD – odchylenie standardowe; WZ – współczynnik zmienności; ^a – ta sama litera w rzędzie oznacza brak istotnego zróżnicowania cechy w kolumnie dla danego czynnika.

4.7. Zawartość składników pokarmowych w słomie

4.7a. Doświadczenie nienawadniane

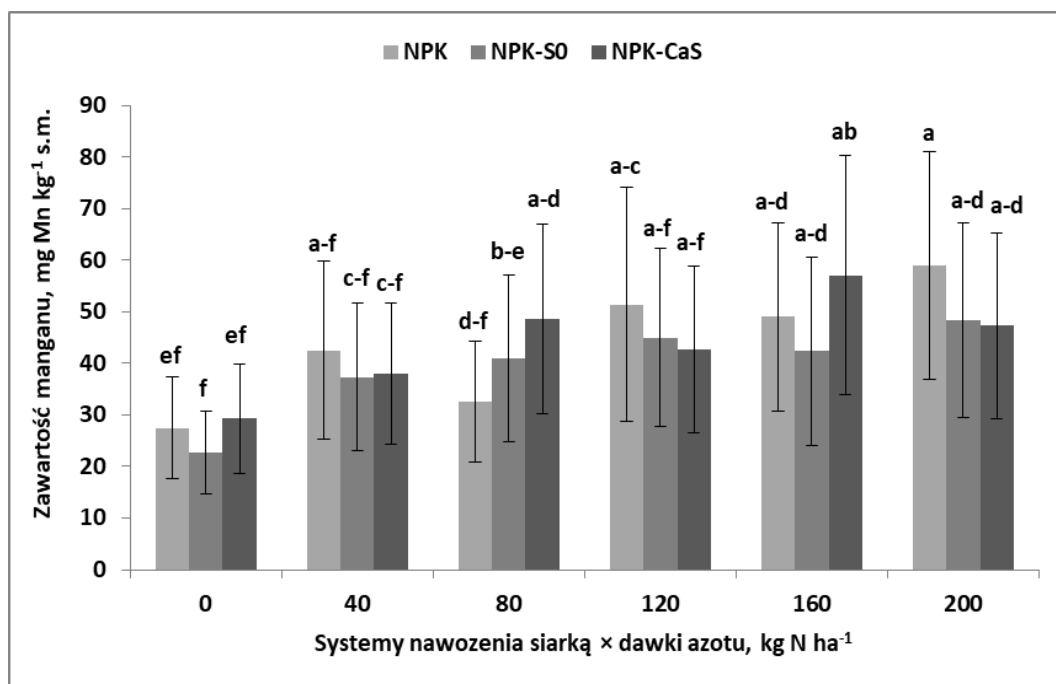
Zawartość Ca i Mn w słomie kształtowało współdziałanie $Lata \times SYS \times ND$ (zał. 4.13a). Zawartość Na zależała od współdziałania $SYS \times ND$ a P, Zn i Ca od $Lata \times ND$. Zawartość pozostałych pierwiastków, a więc N, K, Mg i Fe wykazała specyficzną reakcję na lata i czynniki doświadczalne, lecz nie stwierdzono współdziałania między nimi (tab. 4.13). Jedynie Mg reagował na wszystkie czynniki badawcze, lecz bez współdziałania. Zawartość Mg w 2022 była istotnie i 3-krotnie większa niż w 2020 i 2-krotnie niż w 2021. Na obiektach z siarką zawartość Mg była istotnie mniejsza, niż na NPK. Wzrastające dawki N prowadziły do istotnego wzrostu zawartości omawianego składnika w słomie. Zawartość N, analogicznie, jak Mg, była istotnie większa (2-krotnie) w 2022 w porównaniu do pozostałych lat, a także wzrastała progresywnie z dawkami N. Zawartość K w latach wykazała pełną analogię do Mg, lecz różnice między 2022, a 2020 były ponad 6-krotne. Wzrastające dawki N stymulowały zawartość K w słomie. Zawartość Fe w słomie była największa w 2021, a istotnie najmniejsza w 2020. Istotny wpływ N ujawnił się tylko między kontrolą N a kombinacjami z N. Zawartość składników pokarmowych w słomie wykazała bardzo dużą zmienność (WZ), przekraczającą 35%. Szczególnie dużą odnotowano dla Ca (89%).

Wszystkie analizowane pierwiastki były istotnie skorelowane z plonem ziarna, a największa wartość współczynnika korelacji odnotowano dla Mn ($r = 0,57^{***}$) (zał.4.13b.). Zależność ta została w pełni potwierdzona na drodze przeprowadzonej analizy regresji krokowej. Uzyskane równanie przedstawia się następująco:

$$PLZ = 6,42 + 0,024Mn \text{ dla } n = 54, R^2 = 0,32, p \leq 0,001$$

Zmienność zawartości Mn w słomie, pomimo istotności otrzymanej zależności, tłumaczy zaledwie w 32% zmienności plonu ziarna. Średnio, najmniejszą zawartość Mn w słomie stwierdzono na kontroli N. Zastosowanie azotu prowadziło do wzrostu średniej zawartości składnika, lecz zmiennie dla systemów nawożenia siarką (ryc. 4.29). Współczynnik zmienności dla systemów nawożenia siarką na tle dawek azotu wahał się do około 7% na kombinacji 40 kg ha^{-1} do prawie 20% na kombinacji 80 kg ha^{-1} . Dla pozostałych kombinacji był mały (<15%). Większą zmienność odnotowano dla dawek azotu na tle systemów nawożenia siarką. Wartości WZ przekraczały 20%, lecz jednocześnie były mniejsze na obiektach z siarką. Trend zawartości Mn w słomie na NPK był zmienny reakcji na dawki N, lecz najlepsze dopasowanie wyników uzyskano

dla funkcji liniowej (ryc. Z.4.24). Na obiekcie NPK-S0 trend reakcji omawianej cechy na dawki N najlepiej odzwierciedla funkcja kwadratowa. Maksymalną zawartość Mn, wynoszącą 46 mg Mn kg⁻¹ s.m. słomy otrzymano dla N_{opt} = 162,5 kg ha⁻¹. Analogiczny trend uzyskano na obiekcie NPK-CaS, a wartości kardynalne wynosiły odpowiednio 49,5 mg Mn kg⁻¹ s.m. i 150 kg N ha⁻¹.



Ryc. 4.29. Zawartość manganu w słomie kukurydzy w reakcji na systemy nawożenia siarką i dawki azotu – doświadczenie nienawadniane.

Źródło: opracowanie własne. ^ate same oznaczenia literowe oznaczają brak istotnych różnic między kolumnami; pionowy słupek w kolumnie określa wielkość standardowego błędu średniej.

Zawartość Mn w słomie wykazała największy związek korelacyjny z zawartością Fe ($r = 0,85^{***}$). Analiza regresji krokowej wykazała, że predykcyjny zestaw składników pokarmowych, określający zawartość Mn, obejmował cztery pierwiastki: N, K, Zn, Cu. Otrzymana zależność przedstawia się następująco:

$$Mn = 2,86 - 2,6N + 6,9K + 4,0Zn - 11,5Cu \text{ dla } n = 54, R^2 = 0,84 \text{ i } p \leq 0,01$$

Z analizy tego równania wynika, że zawartość Mn w słomie stymulowały K i Zn a ograniczały N i Cu. Spośród tego zestawu pierwiastków, tylko Zn i Cu wykazały zmienność w reakcji na współdziałanie Lata \times ND (zał. 4.13a). Głównym czynnikiem determinującym zmienność tych cech były lata (ryc. Z.4.24). Wartości WZ dla lat na tle dawek azotu wahały się w zakresie od 51,3% dla kontroli N po 62,6% na kombinacji 160 kg N ha⁻¹. Największa zawartość Zn notowano w 2022, która średnio była 3-krotnie większa niż w 2020. Zmienność zawartości Zn dla dawek N na tle lat była dużo mniejsza, gdyż w 2020 nie przekroczyła 8%, a w 2021 osiągnęła prawie 20%. Analogicznie przedstawia się zmienność zawartości Cu w słomie, która była ściśle skorelowana z zawartością Zn ($r = 0,97^{***}$).

Tabela 4.13. Zawartość składników pokarmowych w słomie kukurydzy – doświadczenie nienawadniane.

Czynnik	Poziom Czynnika	N	P	K	Na	Mg	Ca	Fe	Mn	Zn	Cu
		g kg ⁻¹ s.m.						mg kg ⁻¹ s.m.			
Lata (L)	2020	10,9 ^b	0,6 ^c	2,7 ^c	50 ^c	410 ^c	478 ^c	33,5 ^c	10,7 ^c	7,7 ^c	1,0 ^c
	2021	9,2 ^c	1,1 ^b	10,4 ^b	129 ^b	655 ^b	1267 ^b	87,5 ^a	60,8 ^a	12,2 ^b	3,6 ^b
	2022	23,0 ^a	1,4 ^a	16,5 ^a	190 ^a	1349 ^a	4776 ^a	80,3 ^b	55,4 ^b	25,0 ^a	8,8 ^a
F _{ob, p}		1736***	117***	977***	233***	391***	698***	337***	352***	512***	1472***
Systemy nawożenia siarką (SYS)	NPK	14,1	1,1	10,2	123	868 ^a	2195	69,0	43,6	15,0	4,6
	NPK-S ⁰	14,6	1,0	9,7	126	764 ^b	2095	66,4	39,5	14,8	4,3
	NPK-CaSO ₄	14,4	1,0	9,7	120	782 ^b	2231	66,0	43,8	14,9	4,5
F _{ob, p}		1,6 ^{ns}	1,4 ^{ns}	1,7 ^{ns}	0,5 ^{ns}	5,1**	0,7 ^{ns}	1,0 ^{ns}	2,8 ^{ns}	0,1 ^{ns}	1,6 ^{ns}
Dawki azotu (ND) kg N ha ⁻¹	0	12,2 ^c	0,9 ^b	8,6 ^c	122	725 ^c	2067	61,9 ^b	26,5 ^c	11,8 ^c	3,7 ^b
	40	12,9 ^c	1,0 ^{ab}	9,9 ^{ab}	125	778 ^{bc}	2030	71,5 ^a	39,3 ^b	14,1 ^b	4,4 ^a
	80	14,3 ^b	1,0 ^{ab}	10,0 ^{ab}	123	824 ^{ab}	2322	69,6 ^{ab}	40,7 ^b	15,0 ^{ab}	4,6 ^a
	120	15,3 ^{ab}	1,0 ^{ab}	9,6 ^{bc}	121	820 ^{ab}	2051	64,9 ^{ab}	46,4 ^{ab}	15,9 ^{ab}	4,6 ^a
	160	15,6 ^a	1,0 ^{ab}	10,1 ^{ab}	124	795 ^{bc}	2376	65,0 ^{ab}	49,5 ^a	16,0 ^{ab}	4,6 ^a
200	15,9 ^a	1,2 ^a	11,0 ^a	124	885 ^a	2196	69,8 ^{ab}	51,6 ^a	16,8 ^a	4,8 ^a	
F _{ob, p}		34,8***	3,0*	6,3***	0,1	2,3*	1,5	2,7*	19,3***	10,3***	6,9***
Średnia		14,4	1,0	9,9	123,1	804,6	2174	67,1	42,3	14,9	4,5
OSD		6,4	0,4	5,7	61,4	412,0	1931	24,7	25,6	7,8	3,3
WZ,%		44,4	37,6	58,2	49,9	51,2	88,8	36,8	60,5	52,2	73,0

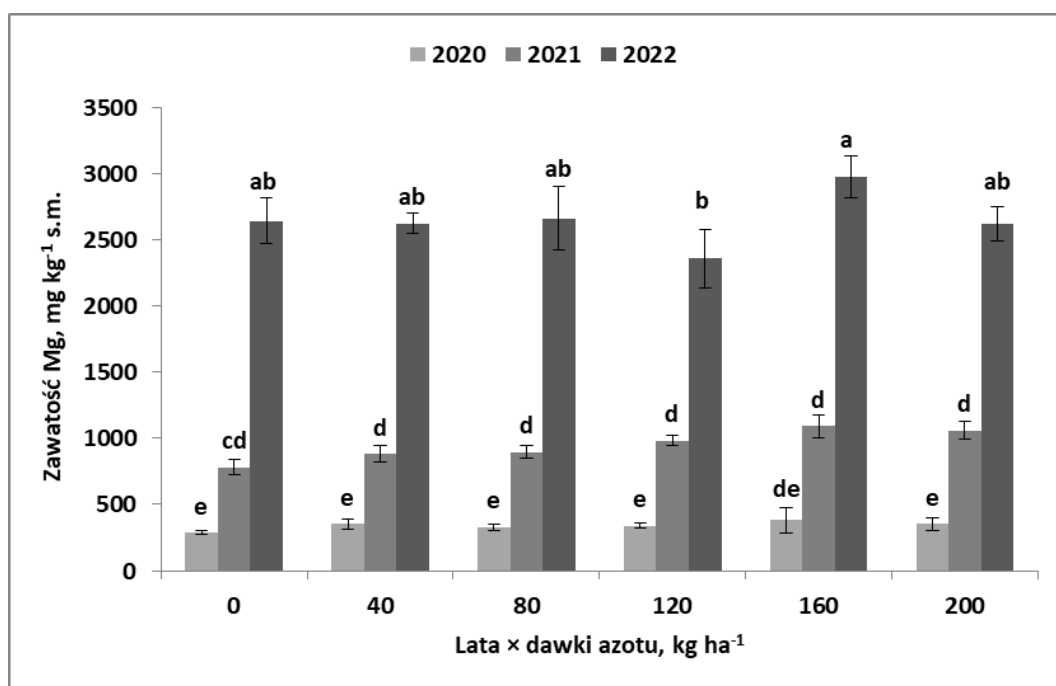
Źródło: opracowanie własne. ***, **, * - istotność na poziomie 0,001; 0,01; 0,05; ns – brak istotnego działania czynnika; OSD – odchylenie standardowe; WZ – współczynnik zmienności; ^a – ta sama litera w rzędzie oznacza brak istotnego zróżnicowania cechy w kolumnie dla danego czynnika.

4.7b. Doświadczenie nawadniane

Największą wrażliwość na czynniki badawcze odnotowano dla N, K, Na, Ca, Mn i Zn, których zawartość w słomie kukurydzy zależała od współdziałania Lata × SYS × ND (zał. 4.14a). Zawartość P zależała od współdziałania SYS × ND; Mg i Cu od współdziałania Lata × ND, a Fe od Lata × SYS. Wartości WZ były najmniejsze dla N, K, P i Fe, mieszcząc się z zakresie średnim dla tego współczynnika (15-35%) (tab. 4.14). Nieznacznie większą wartość WZ, powyżej 35%, odnotowano dla Zn. Największe wartości omawianego współczynnika odnotowano dla Mg i Ca (>75%).

Większość analizowanych składników pokarmowych w słomie, za wyjątkiem Na, Fe i Cu, wykazały związki korelacyjne z plonem ziarna (zał. 4.14b). Tylko dla P odnotowano zależność ujemną (-0,48^{***}). Największą wartość współczynnika korelacji stwierdzono dla Mg (+0,68^{***}). Kluczowa rola Mg w predykcji plonu ziarna została potwierdzona na drodze przeprowadzonej analizy regresji krokowej:

$$PLZ = 7,954 + 0,001Mg \text{ dla } n = 54, R^2 = 0,46 \text{ i } p \leq 0,001$$



Ryc. 4.30. Zawartość magnezu w słomie kukurydzy w reakcji na dawki azotu w latach badań – doświadczenie nawadniane.

Źródło: opracowanie własne. ^ate same oznaczenia literowe oznaczają brak istotnych różnic między kolumnami; pionowy słupek w kolumnie określa wielkość standardowego błędu średniej.

Otrzymane równanie informuje, że za zmienność plonu ziarna w 46% odpowiadała zmienność zawartości Mg w słomie kukurydzy. Zawartość tego pierwiastka zależała od współdziałania Lata × ND (ryc. 4.30). W istocie rzeczy,

zmiennosc zawartosci Mg ksztaltowaly Lata. Wartości WZ dla lat na tle dawek azotu wahaly się od 84% dla kombinacji 120 kg N ha⁻¹ do 100% na kontroli azotowej. Natomiast zmiennosc dla dawek azotu na tle lat wynosila 9,5% w 2020 poprzez 12,4% w 2021 i 7,4% w 2022.

Zawartosc Mg w slosmie kukurydzy wykazala najwiekszy zwiazek korelacyjny z zawartoscia Zn ($r = 0,82^{***}$). Jednakze pula pierwiastkow, okreslajacych zawartosc Mg w slosmie byla znacznie szersza i obejmowala P, K, Ca i Zn. Rownanie uzyskane w wyniku przeprowadzonej analizy regresji krokowej przedstawia się nastepujaco:

$$Mg = -216,1 - 673,3P + 40,2K + 0,52Ca + 41Zn \text{ dla } n = 54, R^2 = 0,97 \text{ i } p \leq 0,01$$

Z otrzymanego rownania wynika, ze zawartosc Mg w slosmie ograniczal niedobor K, Ca i Zn a jednoczesnie nadmiar P. Zawartosc Mg byla bardzo silnie zawiązana z zawartoscia Ca ($r = 0,96^{***}$) i Zn ($r = 0,82^{***}$) (zał. 14.b). Zawartosc P w slosmie kukurydzy wykazala zalezność od wspoldzialania SYS \times ND (ryc. Z.4.26). Zawartosc P w slosmie podlegala pewnym wahaniom w zalezności od czynnikow doswiadczalnych. Dla systemow nawozenia siarka na tle dawek N wahala się od okolo 5% na kombinacji 120 kg N ha⁻¹ do prawie 19% na kombinacji 160 kg N ha⁻¹. Natomiast zmiennosc dla dawek azotu na tle systemow nawozenia siarką byla bardzo mala, wzrastajac od 6,6% na NPK do 11% na NPK-CaS.

Tabela 4.14. Zawartość składników pokarmowych w słomie kukurydzy – doświadczenie nawadniane.

Czynnik	Poziom Czynnika	N	P	K	Na	Mg	Ca	Fe	Mn	Zn	Cu
		g kg ⁻¹ s.m.			mg kg ⁻¹ s.m.						
Lata (L)	2020	8,6 ^a	0,57 ^b	13,5 ^b	64 ^c	339 ^c	345 ^c	32,7 ^c	8,1 ^c	6,3 ^c	1,2 ^c
	2021	8,0 ^b	0,80 ^a	10,7 ^c	256 ^a	948 ^b	1683 ^b	76,6 ^a	52,2 ^a	9,4 ^b	3,6 ^a
	2022	9,0 ^a	0,42 ^b	15,2 ^a	172 ^b	2646 ^a	3709 ^a	64,3 ^b	45,0 ^b	13,5 ^a	2,5 ^b
F _{ob, p}		11,2***	144***	72,3***	434***	1285***	449***	233***	376***	198***	309
Systemy nawożenia siarką (SYS)	NPK	8,8 ^a	0,61	13,0 ^{ab}	157 ^b	1346 ^a	2021 ^a	55,8 ^b	35,1	9,7	2,4
	NPK-S ⁰	7,9 ^b	0,56	12,8 ^b	173 ^a	1213 ^b	1716 ^b	56,9 ^{ab}	34,3	9,8	2,4
	NPK-CaSO ₄	8,8 ^a	0,62	13,5 ^a	162 ^{ab}	1373 ^a	2000 ^a	60,9 ^a	35,8	9,7	2,6
F _{ob, p}		10,8***	3,8*	1,9	3,3	6,6**	4,5*	3,2*	0,4	0,1	2,1
Dawki azotu (ND) kg N ha ⁻¹	0	7,6 ^b	0,58	12,4	169	1236 ^b	1663 ^b	62,8	30,3 ^b	9,3 ^{ab}	2,3 ^b
	40	7,5 ^b	0,58	13,0	169	1284 ^b	1953 ^{ab}	56,6	34,7 ^{ab}	9,2 ^{ab}	2,3 ^b
	80	8,0 ^b	0,58	13,4	150	1294 ^{ab}	1881 ^{ab}	55,8	34,3 ^{ab}	8,8 ^b	2,3 ^b
	120	8,2 ^b	0,60	13,4	166	1226 ^b	1730 ^{ab}	56,5	40,4 ^a	10,4 ^a	2,6 ^a
	160	9,7 ^a	0,59	12,9	165	1482 ^a	2178 ^a	57,9	35,1 ^{ab}	10,3 ^a	2,6 ^a
	200	10,1 ^a	0,64	13,6	165	1344 ^{ab}	2071 ^{ab}	57,7	35,8 ^{ab}	10,5 ^a	2,5 ^a
F _{ob, p}		26,0***	1,1	1,2	1,1	4,0**	3,0*	1,4	3,5**	4,1**	2,5*
Średnia		8,5	0,6	13,1	164,2	1311,0	1912,3	57,9	35,1	9,7	2,4
OSD		1,4	0,2	2,5	83,0	1005,1	1486,6	20,2	21,7	3,4	1,1
WZ,%		16,8	29,9	19,1	50,6	76,7	77,7	35,0	62,0	35,2	43,2

Źródło: opracowanie własne. ***, **, * - istotność na poziomie 0,001; 0,01; 0,05; ns – brak istotnego działania czynnika; OSD – odchylenie standardowe; WZ – współczynnik zmienności; ^a – ta sama litera w rzędzie oznacza brak istotnego zróżnicowania cechy w kolumnie dla danego czynnika.

4.8. Azot mineralny w glebie – stadium BBCH 14

4.8a. Doświadczenie nienawadniane

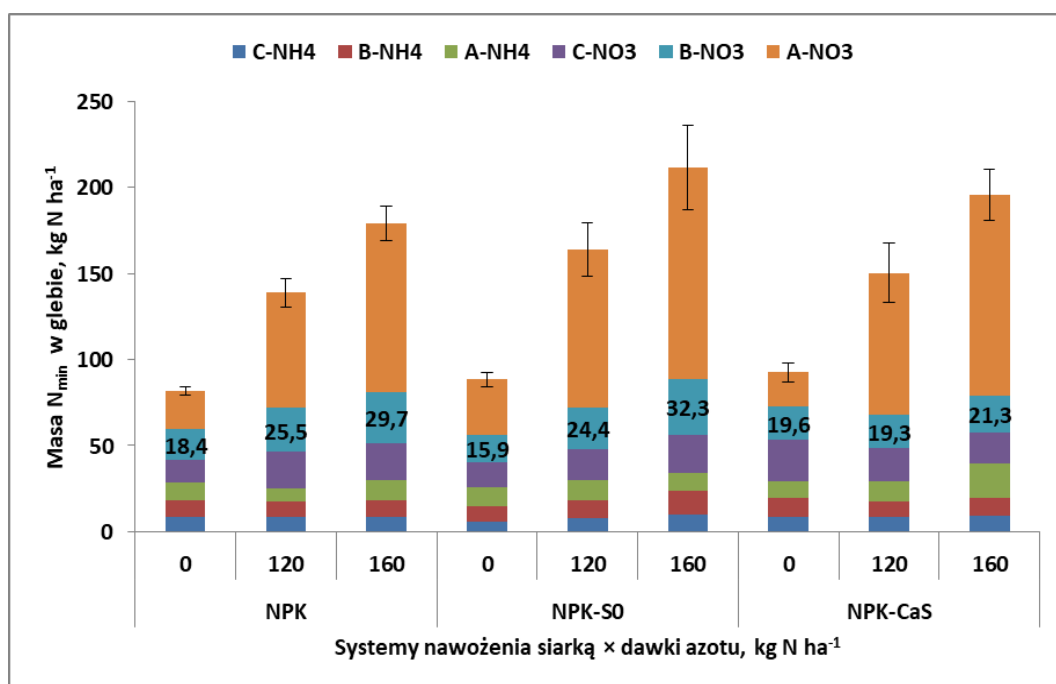
Masa azotu mineralnego (N_{\min}) w glebie obiektu prowadzonego w naturalnych warunkach wodnych w stadium BBCH 14 wykazała dla większości analizowanych cech, za wyjątkiem N-NH₄ w warstwie 60-90 cm (warstwa C, C-NH₄), zależność od współdziałania Lata \times SYS \times ND (zał. 4.15a). Zmienność tej cechy kształtowało współdziałanie Lata \times ND. Wartości współczynnika zmienności (WZ), za wyjątkiem masy N_{\min} w warstwie C (60-90 cm) i C-3, przekraczały 35%, a więc były duże. Największą wartość WZ, nieznacznie powyżej 70% odnotowano dla masy N-NH₄ w warstwie 0-30 cm (A-NH₄) a zbliżoną do tej wartości dla masy N-NO₃ także w warstwie A (A- N_{\min}) (tab. 4.15).

Głównym czynnikiem, wywołującym zmienność masy N_{\min} , w tym obu form, były lata. Masa N-NH₄ w warstwach A i B (A-NH₄ i B-NH₄) była istotnie mniejsza w 2020. W pozostałych latach była 2- lub 3- krotnie większa. Masa N-NH₄ w 2021 warstwie C była ponad 2-krotnie większa niż w pozostałych obu latach prowadzenia badań (tab. 4.15). Systemy nawożenia siarką zwiększały masę N-NH₄, lecz istotnie tylko w warstwie A. Na obiekcie NPK-S0 zaznaczył się trend wzrostowy (+12,1%), a na NPK-CaS wartość ta była istotnie większa (+38,4%) od notowanej na NPK. Istotny wpływ dawek azotu na masę N-NH₄ stwierdzono dla A-NH₄ i C-NH₄. Masa A-NH₄ kształtowała się na poziomie 10 kg N ha⁻¹ dla kontroli N i kombinacji 120 kg N ha⁻¹, wykazując istotny wzrost dopiero przy dawce 160 kg N ha⁻¹ (+34,2%). Analogiczny trend wystąpił w warstwie B, lecz nie został potwierdzony statystycznie. W warstwie C masa N-NH₄ była mniejsza niż w poprzednich warstwach, lecz działanie dawek azotu było istotne dla 160 kg N ha⁻¹ (+27%) w stosunku do kontroli N).

Masa N-NO₃, zwłaszcza w warstwie A, była wielokrotnie większa w porównaniu do masy N-NH₄. W 2020 różnica ta była 15,5-krotna, w 2021 7-krotna, a w 2022 tylko 3,7-krotna. Różnice zaznaczyły się także w głębszych warstwach gleby, lecz znaczne wystąpiły tylko w 2020. W warstwie A istotnie większą masę N-NO₃ odnotowano w 2021 niż w pozostałych latach (+19,6 i 17,1 kg N ha⁻¹, odpowiednio dla 2020 i 2022). W głębszych warstwach gleby masa N-NO₃ była wielokrotnie mniejsza, niż w warstwie powierzchniowej. Trendy spadkowe ujawniły się wyraźniej w 2021 i 2022, niż w 2020. W warstwie B masa N-NO₃ kształtowała się odmiennie niż w A, gdyż istotnie największą masę składnika odnotowano w 2022, a istotnie mniejszą w

2020 i 2021. Natomiast w warstwie C masa N kształtowała się w kolejnych latach odwrotnie niż w warstwie A. Wpływ systemów nawożenia siarką odnotowano tylko w warstwie A. Najmniejszą masę N-NO₃ stwierdzono w glebie obiektu NPK. Zastosowanie S⁰ zwiększyło istotnie masę składnika o 20 kg N ha⁻¹ (+32,2%), a CaS o 10,7 kg N ha⁻¹ (+17,2%). Masa N-NO₃ w warstwie A na kombinacji 120 kg N ha⁻¹ w stosunku do kontroli N zwiększyła się ponad 3-krotnie, a na kombinacji 160 kg N ha⁻¹ 4,5-krotnie. W warstwach głębszych ujawnił się ten sam trend wzrostu, lecz mniejszy niż w warstwie A.

Masę całkowitą N_{min} w stadium BBCH 14 kukurydzy kształtowało współdziałanie Lata × SYS × ND (ryc. 4.31). Wpływ lat na zmienność masy N_{min} przedstawiono z użyciem standardowego błędu średniej. Ogólnie trend masy N_{min} wyznaczały dawki N. System nawożenia siarką modyfikował wartości omawianej cechy. Na kontroli N notowano trend wzrostowy masy N_{min}, która zwiększyła się z 82 kg ha⁻¹ na NPK poprzez 88 kg N ha⁻¹ na obiekcie NPK-S0 do 93 kg ha⁻¹ na obiekcie NPK-CaS. Wzrost masy N_{min} następował progresywnie ze wzrostem dawki nawozowej N. Na kombinacji 120 kg N ha⁻¹ wynosił odpowiednio 70%, 86% i 61% w stosunku do kontroli N danego obiektu. Na kombinacji 160 kg N ha⁻¹ wartości te były większe, ulegając, co najmniej podwojeniu w stosunku do odpowiedniej kontroli N (103%, 139%, 110%)



Ryc. 4.31. Masa i struktura rozmieszczenia form N_{min} w warstwie 0-90 cm gleby w stadium BBCH 14 kukurydzy w zależności od systemów nawożenia siarką i dawek azotu

– doświadczenie nienawadniane. Źródło: opracowanie własne.

^ate same oznaczenia literowe oznaczają brak istotnych różnic między kolumnami; pionowy słupek w kolumnie określa wielkość standardowego błędu średniej. 18,4 – diagnostyczna dla plonu warstwa gleby.

Wpływ czynników doświadczalnych na masę N_{\min} i struktura rozmieszczenia form N nieorganicznego w warstwach gleby na tle lat przedstawiono dla współdziałania $SYS \times ND$ (ryc. 4.31). Ogólny trend wyznaczała masa N- NO_3 w warstwie A, która wzrastała progresywnie z dawką zastosowanego N. Na obiekcie NPK masa N- NO_3 w tej warstwie zwiększyła się 3-krotnie i prawie 5-krotnie na kombinacji 120 i 160 kg N ha^{-1} w stosunku do kontroli N. Ten sam trend odnotowano na obiektach z siarką, lecz różnice były większe, zwłaszcza na obiekcie NPK-CaS. Masa N w tej warstwie gleby wywierała największy wpływ na $N_{\min 15}$ ($r = 0,97^{***}$, zał. 4.15b). Analogiczne trendy masy N- NO_3 , lecz o dużo mniejszej skali, zaobserwowano w głębszych warstwach gleby, w tym w warstwie C, za wyjątkiem NPK-CaS. Na tym obiekcie odnotowano spadek masy N- NO_3 po zastosowaniu 160 kg N ha^{-1} . Mniejsze różnice w masie N między obiektami odnotowano dla N- NH_4 , które najczęściej były nieistotne. Na obiekcie NPK-S0 zaznaczały się najsilniej w warstwach B, C niż A, a na NPK-CaS w warstwie A.

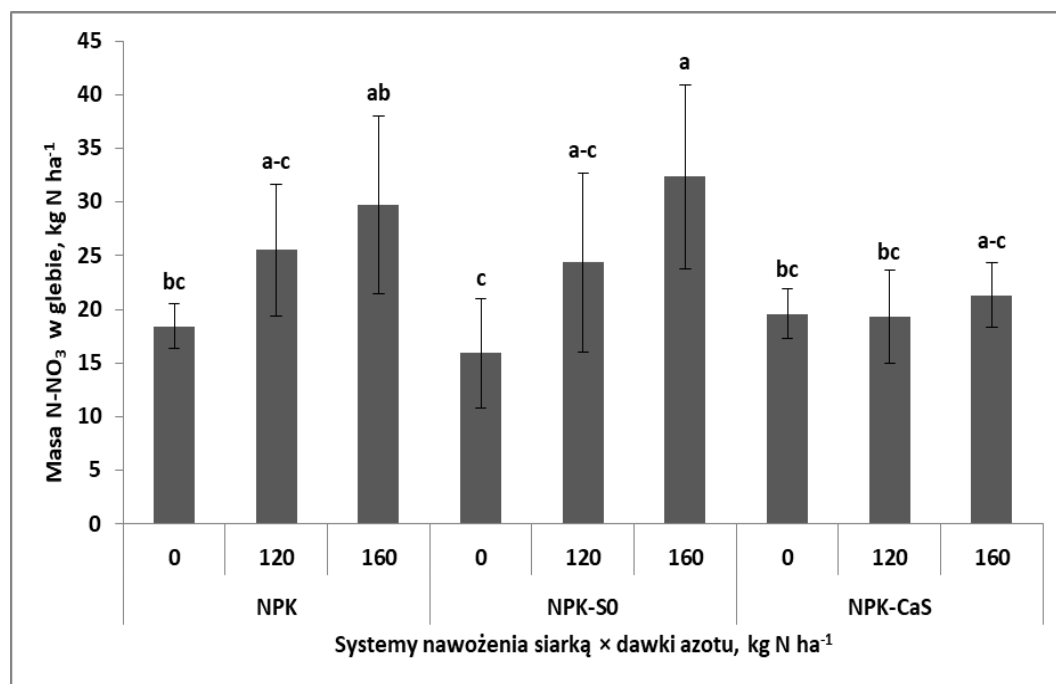
Analiza udziału procentowego obu form nieorganicznych N, niezależnie od warstwy gleby, wykazała dominację N- NO_3 , lecz udział tej formy zależał od dawki azotu i systemu nawożenia siarką (ryc. Z. 4.27). Na kontroli N odnotowano 6- i 4-procentowy wzrost masy N- NO_3 na obiektach z siarką w stosunku do NPK. Natomiast udział tej formy N na kombinacjach nawożonych N, niezależnie od obiektu, mieściła się w zakresie 80-84%.

Spośród 10 analizowanych cech, opisujących N_{\min} , aż siedem wykazało istotny, dodatni wpływ na plon ziarna (zał. 4.15b). Przeprowadzona analiza regresji krokowej wykazała, że główną formą N_{\min} , warunkującą plon ziarna, była masa N- NO_3 w warstwie B. Uzyskane równanie przedstawia się następująco:

$$PLZ = 6,02 + 0,06B - NO_3 \text{ dla } n = 27, R^2 = 0,22 \text{ i } p \leq 0,01$$

Wartość współczynnika determinacji (R^2) jest mała, lecz istotna. Należy podkreślić, że masa N- NO_3 w warstwie B była także istotnie skorelowana z LZ i MTZ (zał. 4.15b). Jednocześnie należy zaznaczyć, że wartość współczynnika korelacji (r) dla N_{\min} w warstwie C była istotnie skorelowana z plonem, pomimo, że nie odnotowano takiej zależności dla form N_{\min} w tej warstwie. Masa N- NO_3 w warstwie B wzrastała wraz z dawką N na obiektach NPK i NPK-S0. Na kombinacji 120 kg N ha^{-1} wzrost ten był

istotny i wyniósł 44,4 %, a na 160 kg N ha⁻¹ osiągnął 75%. Analogiczny trend uzyskano na obiekcie NPK-S0, który kształtował się jak, 50 i 100%. A na NPK-CaS nie odnotowano zmian w reakcji na wzrastające dawki N (ryc. 4.32).



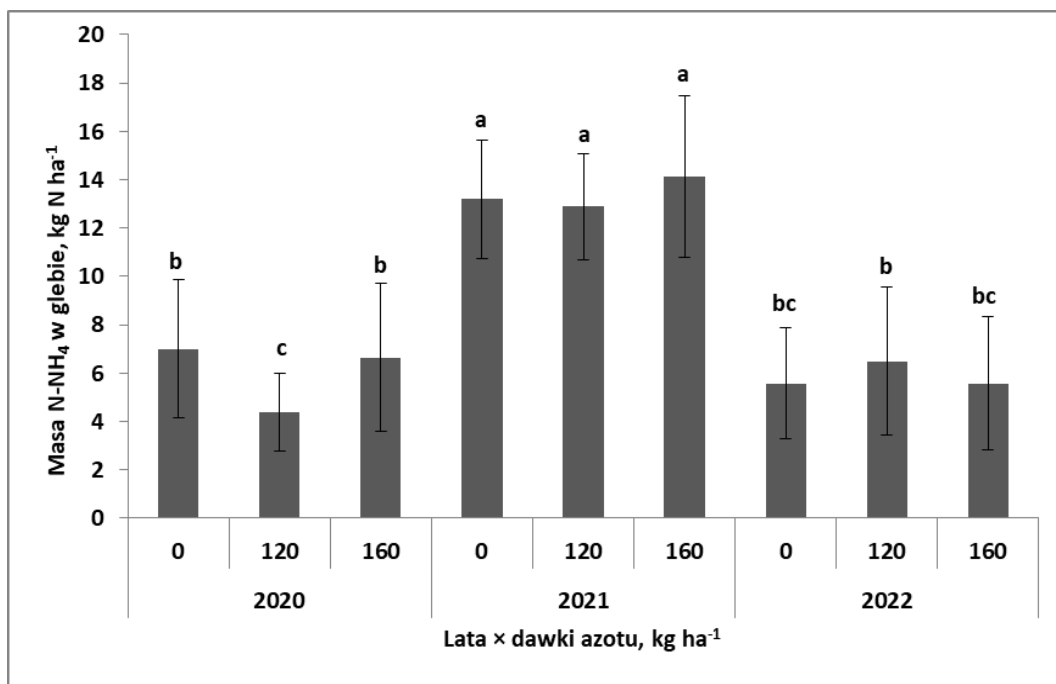
Ryc. 4.32. Masa azotu azotanowego w warstwie 30-60 cm gleby (B-NO₃) w stadium BBCH 14 kukurydzy w zależności od systemów nawożenia siarką i dawek azotu – doświadczenie nienawadniane.

Źródło: opracowanie własne. ^ate same oznaczenia literowe oznaczają brak istotnych różnic między kolumnami; pionowy słupek w kolumnie określa wielkość standardowego błędu średniej.

Diagnostyczna składowa plonu, jaką w omawianym doświadczeniu, okazała się LZK wykazała istotną zależność od masy N-NH₄ w warstwie C. Uzyskane równanie przedstawia się następująco:

$$LZK = 274.4 + 12,8C - NH_4 \text{ dla } n = 27, R^2 = 0,48 \text{ i } p \leq 0,001$$

Głównym czynnikiem wpływającym na całkowitą masę N-NH₄ w glebie była Lata × ND (ryc. 4.33). Największą masę N-NH₄ odnotowano w 2021, która była ona ponad 2-krotnie większa w porównaniu do pozostałych lat. W żadnym z lat nie odnotowano jednoznacznego trendu masy N-NH₄ w glebie ze względu na wzrastające dawki N.



Ryc. 4.33. Masa azotu amonowego w warstwie 60-90 cm gleby (C-NH₄) w stadium BBCH 14 kukurydzy w zależności od systemów nawożenia siarką i dawek azotu – doświadczenie nienawadniane.

Źródło: opracowanie własne. ^ate same oznaczenia literowe oznaczają brak istotnych różnic między kolumnami; pionowy słupek w kolumnie określa wielkość standardowego błędu średniej.

Tabela 4.15. Azot mineralny (N_{\min}) w glebie, kukurydza w stadium BBCH 14 – doświadczenie nienawadniane.

Czynnik	Poziom czynnika	A-NH ₄	B-NH ₄	C-NH ₄	A-NO ₃	B-NO ₃	C-NO ₃	A-N _{min}	B-N _{min}	C-N _{min}	N _{min14}
		kg N ha ⁻¹									
Lata (L)	2020	4,2 ^c	5,8 ^b	6,0 ^b	65,1 ^b	17,4 ^b	19,7 ^a	69,3 ^b	23,2 ^c	25,7	118,2 ^b
	2021	12,1 ^b	13,0 ^a	13,4 ^a	84,7 ^a	20,5 ^b	15,1 ^b	96,8 ^a	33,5 ^b	28,6	158,9 ^a
	2022	18,3 ^a	11,6 ^a	5,9 ^b	67,6 ^b	30,9 ^a	22,6 ^a	85,9 ^a	42,5 ^a	28,5	156,9 ^a
	F _{ob} , P	65***	43,9***	101***	10,9***	18,8***	9,8***	17,9***	25,1***	1,4 ^{ns}	33,9***
Systemy nawożenia siarką (SYS)	NPK	9,9 ^b	9,4	8,6	62,2 ^b	24,6	18,5	72,2 ^b	34,0	27,1	133,2 ^b
	NPK-S ⁰	11,1 ^{ab}	10,9	7,9	82,2 ^a	24,2	18,3	93,2 ^a	35,2	26,2	154,6 ^a
	NPK-CaSO ₄	13,7 ^a	10,1	8,8	72,9 ^{ab}	20,1	20,6	86,6 ^a	30,1	29,4	146,1 ^{ab}
	F _{ob} , P	4,8*	1,8 ^{ns}	1,1 ^{ns}	9,6***	2,3 ^{ns}	1,1 ^{ns}	10,8***	1,8 ^{ns}	1,4 ^{ns}	7,4**
Dawki azotu (ND) kg N ha ⁻¹	0	10,5 ^{ab}	9,8	7,4 ^b	24,6 ^c	18,0 ^b	17,2	35,1 ^c	27,8 ^b	24,7 ^b	87,6 ^c
	120	10,0 ^b	9,4	8,5 ^{ab}	80,5 ^b	23,1 ^{ab}	19,6	90,5 ^b	32,4 ^b	28,1 ^{ab}	151,1 ^b
	160	14,1 ^a	11,3	9,4 ^a	112,3 ^a	27,8 ^a	20,5	126,4 ^a	39,0 ^a	29,9 ^a	195,3 ^a
	F _{ob} , P	6,3**	2,9 ^{ns}	5,0**	190***	9,1***	2,0 ^{ns}	197***	8,6***	3,7*	187***
	Średnia	11,5	10,1	8,4	72,5	22,9	19,1	84,0	33,1	27,6	144,6
	OSD	8,3	4,2	4,0	48,9	10,0	6,5	51,5	12,8	6,7	61,0
	WZ,%	71,9	40,9	47,6	67,6	43,6	34,2	61,4	38,6	24,5	42,2

Źródło: opracowanie własne; ***, **, * - istotność na poziomie 0,001; 0,01; 0,05; ns – brak istotnego działania czynnika; OSD – odchylenie standardowe; WZ – współczynnik zmienności; ^a – ta sama litera w rzędzie oznacza brak istotnego zróżnicowania cechy w kolumnie dla danego czynnika; A, B, C – warstwy gleby, odpowiednio: 0-30, 30-60; 60-90 cm; NO₃ → N-NO₃ – azot azotanowy; NH₄ → N-NH₄ – azot amonowy.

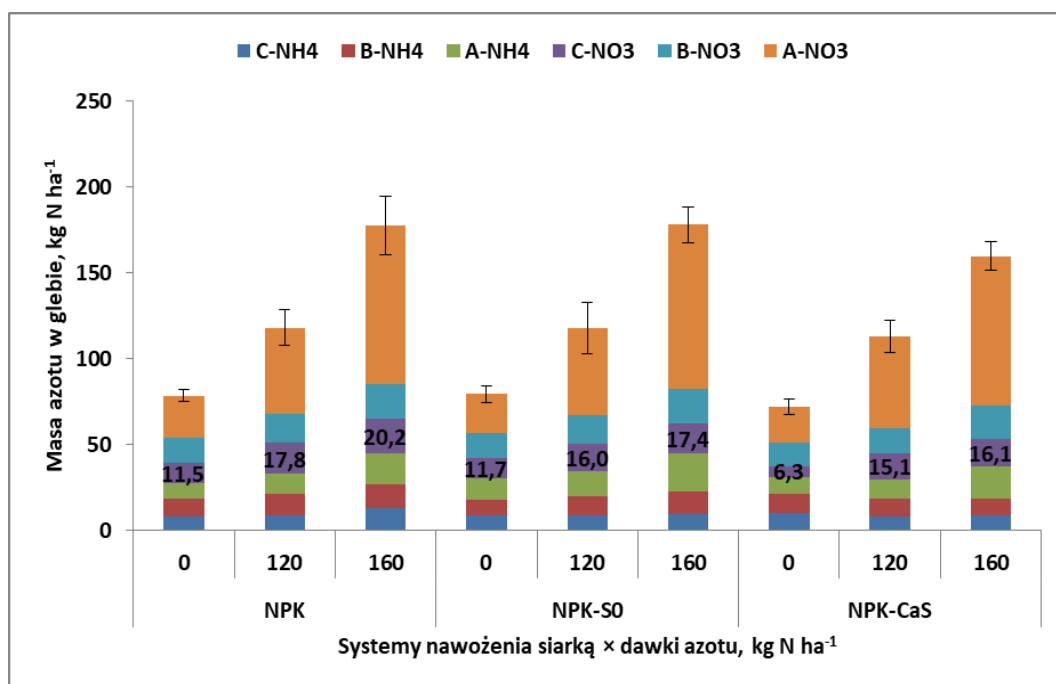
4.8b. Doświadczenie nawadniane

Masa N_{\min} w glebie obiektu nawadnianego w stadium BBCH 14 tylko dla pięciu z dziesięciu analizowanych cech, wykazała zależność od współdziałania $Lata \times SYS \times ND$ (zał. 4.16a). Były to A-NH₄, C-NH₄, A-N_{min}, C-N_{min} i N_{min14}. Masa A-NO₃, B-N_{min} zależała od współdziałania $Lata \times ND$, a C-NO₃ od współdziałania $Lata \times SYS$. Tylko dwie cechy, a mianowicie B-NH₄ i B-NO₃ nie wykazały reakcji na współdziałanie lat i czynników doświadczalnych. Pierwsza z tych cech wykazała tylko zmienność w latach. Wartości współczynnika zmienności (WZ) mniejsze od 35% odnotowano dla B-NO₃, B-N_{min} i C-NO₃ (odpowiednio 20,8%, 28,7% i 33,8%). Współczynnik ten tylko dla N-NO₃ osiągnął wartości największe w warstwie A, wykazując silny trend spadkowy w głębszych warstwach gleby. Natomiast dla N-NH₄ wartości WZ były w każdej warstwie gleby (tab. 4.16).

Głównym źródłem zmienności N_{\min} niezależnie od formy były lata (tab. 4.16). W każdym roku, masa N-NH₄, niezależnie od warstwy gleby, była największa w 2021. Wpływ systemu nawożenia siarką odnotowano tylko dla warstwy A. W tej warstwie gleby zaznaczył się istotny wzrost masy N-NH₄ w glebie nawożonej S⁰ (+24,4% w stosunku do NPK). W pozostałych warstwach gleby różnice między obiektami były nieistotne, lecz zaznaczył się trend spadkowy masy N w glebie traktowanej siarką. Masa N-NO₃ w warstwie A, analogicznie, jak w doświadczeniu prowadzonym w naturalnych warunkach wodnych, była wielokrotnie większa niż masa N-NH₄. Stopień zróżnicowania był zmienny w latach. W 2020 różnica ta była ponad 13-krotna, w 2021 tylko nieco ponad 3-krotna, a w 2022 tylko nieco ponad 2-krotna. W głębszych warstwach gleby różnica w masie obu form N wystąpiła w 2020 i 2022. Istotny wpływ systemów nawożenia siarką na masę N-NO₃ w glebie odnotowano tylko dla warstwy C. Zastosowanie siarki, zwłaszcza w formie CaS prowadziło do spadku masy N w tej warstwie gleby. Wpływ dawki N na masę N-NO₃ był istotny w każdej warstwie gleby, lecz najsilniej zaznaczył się w warstwie A. Każdorazowy wzrost dawki składnika prowadził do istotnego wzrostu masy N-NO₃. W warstwie B istotny wzrost odnotowano dopiero na kombinacji 160 kg N ha⁻¹, a w warstwie C ujawnił się kombinacji 120 kg N ha⁻¹.

Masę całkowitą N_{\min} w stadium BBCH 14 kukurydzy na obiekcie nawadnianym kształtowało współdziałania $Lata \times SYS \times ND$ (ryc. 4.34). Wpływ lat na zmienność masy N_{\min} przedstawiono z użyciem standardowego błędu średniej. Ogólnie trend masy

N_{\min} wyznaczały dawki N. System nawożenia siarką modyfikował wartości omawianej cechy. Na kontroli N masa N_{\min} wynosiła 79 kg ha^{-1} na NPK i NPK-S0 oraz 72 kg ha^{-1} na NPK-CaS. Wzrost masy N_{\min} następował progresywnie ze wzrostem dawki N. Na kombinacji 120 kg N ha^{-1} wynosił odpowiednio 49%, 49% i 57% w stosunku do kontroli dla danego obiektu. Na kombinacji 160 kg N ha^{-1} wartości te były większe, ulegając, co najmniej podwojeniu w stosunku do odpowiedniej kontroli N (125%, 125%, 122%)



Ryc. 4.34. Masa i struktura rozmieszczenia form N_{\min} w warstwie 0-90 cm gleby w stadium BBCH 14 kukurydzy w zależności od systemów nawożenia siarką i dawek azotu – doświadczenie nawadniane. Źródło: opracowanie własne.

^ate same oznaczenia literowe oznaczają brak istotnych różnic między kolumnami; pionowy słupek w kolumnie określa wielkość standardowego błędu średniej. 11,5– diagnostyczna dla plonu warstwa gleby.

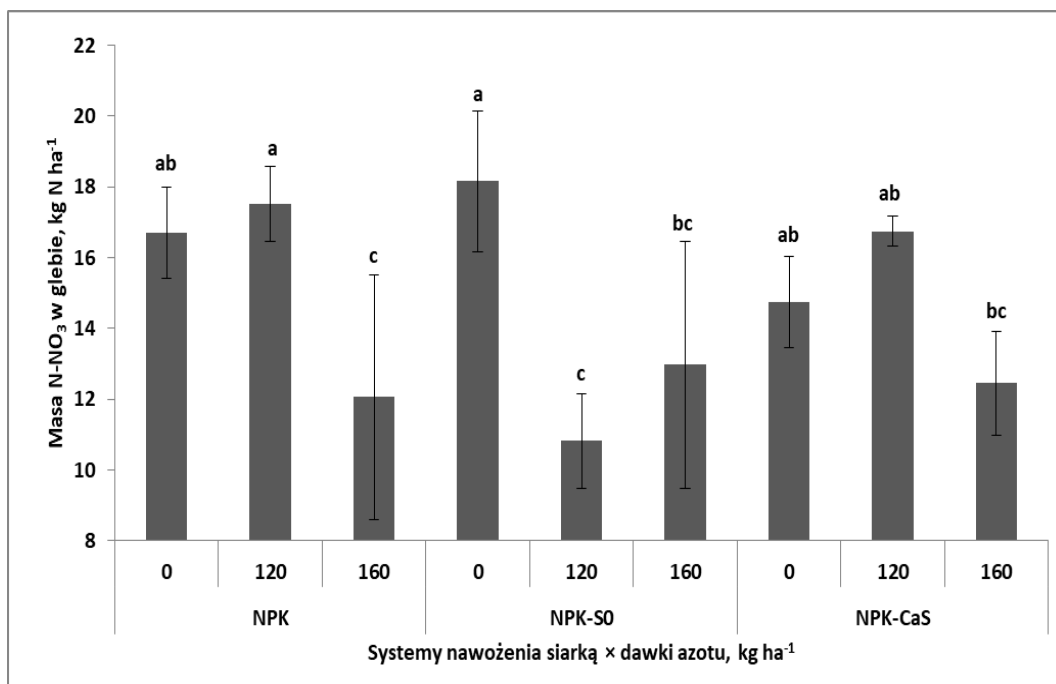
Jak wynika z analizy ryc. 4.34, masę N_{\min} i strukturę rozmieszczenia obu form N_{\min} w warstwach gleby na tle lat, niezależnie od systemu nawożenia siarką, wyznaczały dawki azotu zastosowanego przed siewem. Analogicznie, jak na obiekcie nienawadnianym, analizowany trend N_{\min} wyznaczała masa N-NO₃ w warstwie A. Cecha to istotnym stopniu określała całkowitą wartość $N_{\min 15}$ ($r = 0,92^{**}$), lecz nieznacznie większą wartość diagnostyczną posiadała masa A- N_{\min} ($r = 0,97^{***}$, zał. 4.16b). Na obiekcie NPK masa N-NO₃ w tej warstwie zwiększyła się 2- i prawie 4-krotnie na kombinacji 120 i 160 kg N ha^{-1} w stosunku do kontroli N. Na obiektach z siarką trend ten był analogiczny, lecz różnice między kontrolą N a kombinacją 120 kg N ha^{-1} były większe, zwłaszcza na obiekcie NPK-CaS. Różnica między kontrolą N a

kombinacją 120 kg N ha⁻¹ kształtowała między obiektami na poziomie około 40 kg N ha⁻¹. Znacznie większą różnicę między obiektami odnotowano na kombinacji 160 kg N ha⁻¹ względem 120 kg N ha⁻¹. Przyrost masy N na obiekcie NPK i NPK-S0 wyniósł prawie 60 kg N ha⁻¹, natomiast na NPK-CaS był mniejszy o 13 kg N ha⁻¹. Na kontroli N udział N-NO₃ w całkowitej masie N_{min} zmniejszał się na obiektach z siarką z 64% dla NPK do 62% na NPK-S0 i do 57% na NPK-CaS. Jednocześnie wzrastał udział N-NH₄, który kształtował się odpowiednio, jak 35%, 38% i 43%. Zastosowanie N spowodowało wzrost udziału N-NO₃ o 8 i 11% na NPK do 11 i 14% na NPK-S0 i 14 oraz 20% na NPK-CaS dla kombinacji 120 i 160 kg N ha⁻¹ w stosunku do kontroli N (ryc. Z4.28).

Spośród 10 analizowanych cech, związanych z N_{min}, tylko dwie wykazały istotny, dodatni wpływ na plon (B-NO₃ i C-NO₃). Przeprowadzona analiza regresji krokowej wykazała, że główną formą warunkującą plon była masa N-NO₃ w warstwie 60-90 cm. Otrzymane równanie przedstawia się następująco:

$$PLZ = 6,61 + 0,17C - NO_3 \text{ dla } R^2 = 0,21 \text{ i } p \leq 0,01$$

Wartość współczynnika determinacji jest mała, lecz wpływ tej cechy na plon ziarna był istotny. Działanie to wynikało z faktu, że istotną reakcją na masę N w tej formie wykazywały takie cechy struktury plonu jak R, LZK i LZ (zał. 4.16b). Największą masę N-NO₃ w tej warstwie gleby na obiekcie NPK stwierdzono na kombinacji 120 kg N ha⁻¹. Dalszy wzrost dawki N spowodował spadek masy N-NO₃ o 60 %. Na obiekcie NPK-S0 masa N-NO₃ w glebie na kontroli N była ponad wielokrotnie większa w porównaniu do kombinacji z azotem (na 120 kg N ha⁻¹ była ponad 3-krotna). Odwrotna prawidłowość ujawniła się na obiekcie NPK-CaS. Największą masę N-NO₃ stwierdzono na kombinacji 120 kg N ha⁻¹ (ryc. 4.35).



Ryc. 4.35. Masa azotu azotanowego w warstwie 60-90 cm gleby (C-NO₃) w stadium BBCH 14 kukurydzy w zależności od systemów nawożenia siarką i dawek azotu – doświadczenie nawadniane.

Źródło: opracowanie własne. ^ate same oznaczenia literowe oznaczają brak istotnych różnic między kolumnami; pionowy słupek w kolumnie określa wielkość standardowego błędu średniej.

Tabela 4.16. Azot mineralny (N_{\min}) w glebie, kukurydza w stadium BBCH 14 – doświadczenie nawadniane.

Czynnik	Poziom czynnika	A-NH ₄	B-NH ₄	C-NH ₄	A-NO ₃	B-NO ₃	C-NO ₃	A-N _{min}	B-N _{min}	C-N _{min}	N _{min14}
kg N ha ⁻¹											
Lata (L)	2020	4,7 ^c	5,5 ^c	6,1 ^b	62,5 ^a	15,1 ^b	15,4	67,2 ^b	20,6 ^c	21,6 ^b	109,4 ^b
	2021	20,5 ^a	19,0 ^a	17,9 ^a	66,9 ^a	16,8 ^{ab}	14,0	87,5 ^a	35,8 ^a	31,9 ^a	155,2 ^a
	2022	17,4 ^b	8,7 ^b	4,6 ^c	36,3 ^b	18,3 ^a	14,6	53,8 ^c	26,9 ^b	19,2 ^b	99,9 ^b
	F _{ob} , P	91,2 ^{***}	85,0 ^{***}	252 ^{***}	28,8 ^{***}	4,3 [*]	0,7 ^{ns}	31,3 ^{***}	44,3 ^{***}	40,1 ^{***}	76,0 ^{***}
Systemy nawożenia siarką (SYS)	NPK	13,1 ^b	12,0	10,2	55,8	17,1	16,5 ^a	68,9	29,1	26,7 ^a	124,7
	NPK-S ⁰	16,3 ^a	10,9	9,1	56,5	17,0	15,0 ^{ab}	72,9	28,0	24,2 ^{ab}	125,0
	NPK-CaSO ₄	13,2 ^b	10,3	9,3	53,5	16,1	12,5 ^b	66,6	26,3	21,8 ^b	114,8
	F _{ob} , P	4,4 [*]	1,3 ^{ns}	1,4 ^{ns}	0,3 ^{ns}	0,6 ^{ns}	5,8 ^{**}	1,1 ^{ns}	1,5 ^{ns}	5,2 ^{**}	3,0 ^{ns}
Dawki azotu (ND) kg N ha ⁻¹	0	10,7 ^b	9,8	9,3 ^{ab}	22,7 ^c	14,3 ^b	9,8 ^b	33,4 ^c	24,1 ^b	19,1 ^b	76,6 ^c
	120	12,5 ^b	11,1	8,7 ^b	51,4 ^b	16,2 ^b	16,3 ^a	63,9 ^b	27,3 ^b	25,1 ^a	116,2 ^b
	160	19,5 ^a	12,3	10,7 ^a	91,7 ^a	19,7 ^a	17,9 ^a	111,1 ^a	32,0 ^a	28,5 ^a	171,7 ^c
	F _{ob} , P	27,8 ^{***}	2,6 ^{ns}	4,6 [*]	126 ^{***}	13,5 ^{***}	25,4 ^{***}	166 ^{***}	12,0 ^{***}	20,0 ^{***}	198 ^{***}
	Średnia	14,2	11,1	9,5	55,3	16,7	14,7	69,5	27,8	24,2	121,5
	OSD	9,9	6,4	6,6	34,0	3,5	5,0	37,6	8,0	8,6	49,6
	WZ,%	69,8	58,2	69,5	61,5	20,8	33,8	54,1	28,7	35,6	40,8

Źródło: opracowanie własne; ***, **, * - istotność na poziomie 0,001; 0,01; 0,05; ns – brak istotnego działania czynnika; OSD – odchylenie standardowe; WZ – współczynnik zmienności; ^a – ta sama litera w rzędzie oznacza brak istotnego zróżnicowania cechy w kolumnie dla danego czynnika; A, B, C – warstwy gleby, odpowiednio: 0-30, 30-60; 60-90 cm; NO₃ → N-NO₃ – azot azotanowy; NH₄ → N-NH₄ – azot amonowy.

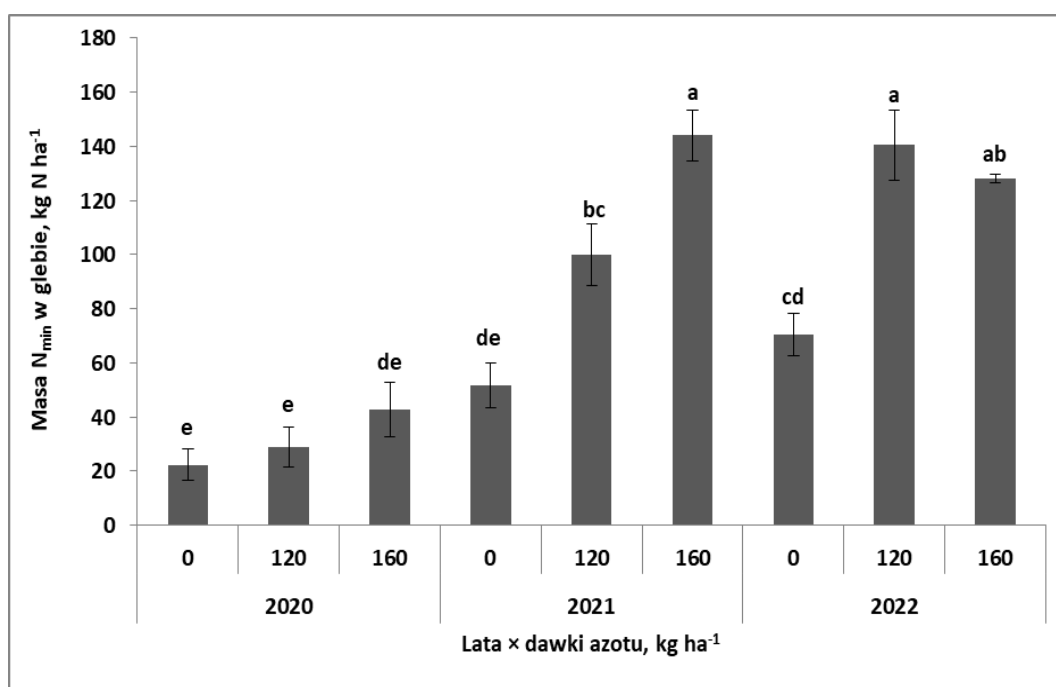
4.9. Azot mineralny w glebie – stadium BBCH 61

4.9a. Doświadczenie nienawadniane

Masa N_{\min} w stadium BBCH 61 kukurydzy dla większości analizowanych cech, za wyjątkiem B- NO_3 , zależała od współdziałania Lata \times ND (zał. 4.17a). Tylko dla czterech cech, a mianowicie A- NH_4 , A- NO_3 , B- NO_3 i A- N_{\min} , stwierdzono zmienność w wyniki współdziałania Lata \times SYS \times ND. W stadium BBCH 61, trend współczynnika zmienności (WZ) dla form N_{\min} i warstw gleby kształtował się odmiennie, niż w stadium BBCH 14 (tab. 4.15 i 4.17). Zmienność (WZ) N- NH_4 była najmniejsza w warstwie A i podwajała się wraz z głębokością. Natomiast dla N- NO_3 wartość WZ kształtowała się powyżej 90% w warstwach A i B, lecz w warstwie C była 2-krotnie mniejsza. Na tym tle, wartości WZ dla N_{\min} wykazały małą zmienność, gdyż wahały się od około 31% w warstwie C do 37% w warstwie B. W konsekwencji wartość omawianego współczynnika dla N_{\min} nie przekroczyła 35%.

Głównym czynnikiem kształtującym zmienność N_{\min} w glebie w stadium BBCH 61 kukurydzy były Lata. Masa N- NH_4 wykazała ekstremalnie dużą zmienność w latach badań (tab. 4.17). Za wyjątkiem 2020, wzrastała wraz z głębokością. Największą masę N w warstwie A stwierdzono w 2022 a najmniejszą, ponad 5-krotnie, w 2020. W 2021 masa N była 4-krotnie większa od notowanej w 2020. W warstwie B i C różnice te były jeszcze większe. Istotny wpływ systemu nawożenia siarką zaznaczył się tylko w warstwie A. Masa N- NH_4 dla obiektu CaS była istotnie większa niż w pozostałych obiektach (+48% w stosunku do NPK). Wpływ dawek N notowano dla każdej warstwy gleby. Trend wzrostu masy N był stały i przejawiał się większymi wartościami, w stosunku do kontroli N na kombinacjach nawożonych N, niezależnie od dawki. Masa N- NO_3 wykazywała te same trendy zmienności w latach, jakie obserwowano dla N- NH_4 . Istotnie najmniejsze wartości notowano w 2020. Wpływ systemu nawożenia siarką ujawnił się dla każdej warstwy gleby. Najmniejszą masę N odnotowano w glebie obiektu CaS. W stosunku do NPK spadek wyniósł 22% w warstwie A, 31% w warstwie B i 15% w warstwie C. Masa N- NO_3 w każdej warstwie gleby wzrastała wraz z dawką zastosowanego N. Największe różnice na kombinacji 160 kg N ha⁻¹, które w warstwie A były 3-krotne w stosunku do kontroli N. W warstwie B różnica ta była 2-krotna, a w warstwie C nastąpił wzrost o 50%.

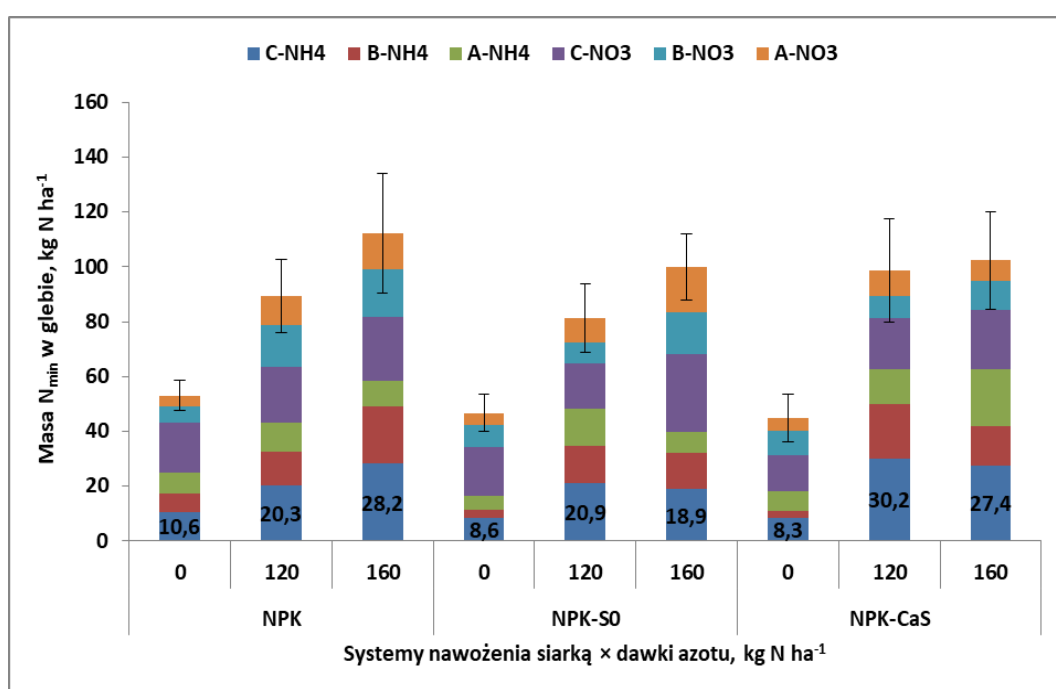
Masa N_{\min} w glebie zależy istotnie od współdziałania Lata \times ND (zał. 4.17a). W 2020 była wielokrotnie mniejsza, niż w pozostałych latach (ryc. 4.36). Zaznaczył się trend wzrostowy, zgodny z wielkością stosowanych dawek azotu. W 2021 masa N_{\min} w glebie była 3-krotnie większa niż w 2020, wykazując istotny wzrost dla kolejnych dawek azotu. W 2022 masa N była jeszcze większa. Odnotowano istotną różnicę na korzyść kombinacji nawożonych azotem.



Ryc. 4.36. Masa N_{\min} w glebie w latach na tle dawek azotu – doświadczenie nienawadniane. Źródło: opracowanie własne; ^ate same oznaczenia literowe oznaczają brak istotnych różnic między kolumnami; pionowy słupek w kolumnie określa wielkość standardowego błędu średniej.

Strukturę rozmieszczenia N_{\min} w glebie, uwzględniając obie formy, przedstawiono na ryc. 4.37. Czynnikiem kształtującym masę N w glebie były dawki azotu, która zwiększały masę składnika zgodnie z wielkością stosowanych dawek. Jednakże na obiekcie NPK-CaS różnica między kombinacjami 120 i 160 kg N ha⁻¹ nie przekroczyła 4 kg N ha⁻¹. Największą, średnią masę N, stwierdzono w warstwie C, która dla obu form N_{\min} kształtowała się na poziomie około 19 kg N ha⁻¹ (N-NH₄ → 19,3±8,5; N-NO₃ → 19,8±4,4). Masa N-NH₄ w całej puli N_{\min} (wszystkie warstwy gleby) wynosiła 23% a N-NO₃ była tylko nieznacznie większa, gdyż stanowiła 26%. Masa C-NH₄ wykazała reakcję na współdziałanie Lata \times ND, wykazując bardzo silny wpływ na masę N_{\min} ($r = 0,94^{***}$). Masa C-NO₃ zależała od współdziałania SYS \times ND, lecz pomimo istotnego wpływu na N_{\min} , zależność ta była słabsza ($r = 0,77^{***}$). Należy podkreślić, że całkowita masa N_{\min} w glebie w stadium BBCH 61 kukurydzy była

istotnie kształtowana przez masę N_{\min} w warstwie C ($r = 0,99^{***}$, tab. 4.17b). Masa N w pozostałych warstwach gleby kształtowała się na poziomie 10 kg N ha^{-1} . Udział $N\text{-NH}_4$ wynosił średnio 13% a $N\text{-NO}_a$ 14% dla warstwy B i 11% dla warstwy A. Struktura udziału obu form N_{\min} była zmienna, zależnie od systemu nawożenia siarką i dawek azotu (ryc. Z4.29). Na obiekcie NPK udział obu form N_{\min} , niezależnie od dawki N, kształtował się na poziomie 50%. Na obiekcie NPK-S0, relacje między obu formami N_{\min} były bardzo zmienne, gdyż najmniejszy udział $N\text{-NO}_3$, wynoszący 41%, ujawnił się na kombinacji 120 kg N ha^{-1} , podczas, gdy na pozostałych był, co najmniej o 20% większy. Na obiekcie NPK-CaS udział $N\text{-NO}_3$ na kombinacji kontrolnej stanowił 59% masy N_{\min} a na nawożonych N nie przekraczał 40%.



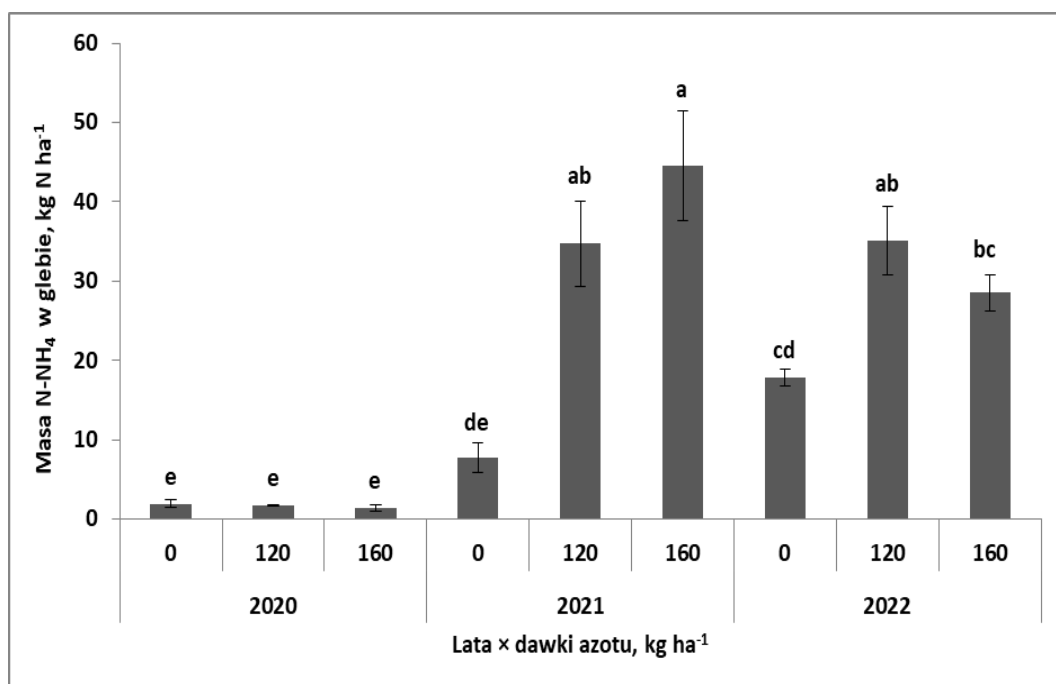
Ryc. 4.37. Masa i struktura rozmieszczenia form N_{\min} w warstwach gleby w stadium BBCH 61 kukurydzy w zależności od systemów nawożenia siarką i dawek azotu – doświadczenie nienawadniane.

Źródło: opracowanie własne; *te same oznaczenia literowe oznaczają brak istotnych różnic między kolumnami; pionowy słupek w kolumnie określa wielkość standardowego błęd średniej. 10,6 – diagnostyczna dla plonu warstwa gleby.

Spośród 10 analizowanych cech aż dziewięć wykazało istotny, dodatni wpływ na plon (zał. 4.17b.). Jedynym wyjątkiem była masa $N\text{-NO}_3$ w warstwie A. Przeprowadzona analiza regresji krokowej wykazała, że główną formą N, warunkującą plon ziarna, była masa $N\text{-NH}_4$ w warstwie C. Otrzymana zależność przedstawia równanie:

$$PLZ = 6,34 + 0,52C - NH_4 \text{ dla } n = 27, R^2 = 0,57 \text{ i } p \leq 0,001$$

Otrzymana równanie informuje, że zmienność masy N-NH₄ w warstwie C wyjaśnia 57% zmienności plonu ziarna kukurydzy. Cecha ta była istotnie skorelowana z elementami struktury plonu, w tym z LZR, LZK, LZ i MTZ (zał. 4.17b). Masa C-NH₄ wykazała ponadto istotną współzależność z masą N-NH₄ w warstwach A i B. Wartości C-NH₄ wykazały istotną zmienność w latach (ryc. 4.38). W 2020 odnotowano najmniejszą ilość N, niezależnie od kombinacji azotowych. W 2021 wartości tej cechy były wielokrotnie większe, a masa N-NH₄ wzrastała zgodnie z dawkami nawozowymi składnika. W stosunku do kontroli N, masa składnika na kombinacji 120 kg N ha⁻¹ zwiększyła się 4,5-krotnie. Dalszy, istotny wzrost notowano na kombinacji 160 kg N ha⁻¹. W 2022, masa N-NH₄ na kontroli N była ponad 2-krotnie większa, niż w 2021. Nawożenie N zwiększyło istotnie zasoby składnika względem kontroli, a wzrost na kombinacji 120 kg N ha⁻¹ był 2-krotny. Natomiast na kombinacji 160 kg N ha⁻¹ odnotowano spadek masy składnika w glebie, lecz tylko względem kombinacji 120 kg N ha⁻¹.

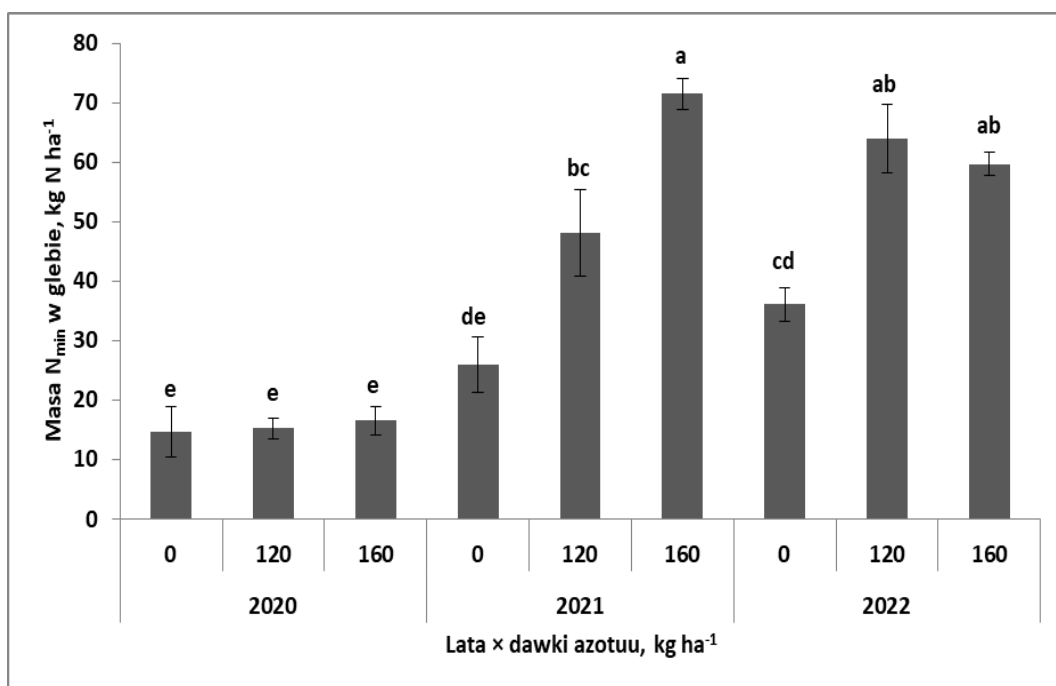


Ryc. 4.38. Masa azotu amonowego w warstwie 60-90 cm gleby (C-NH₄) w stadium BBCH 61 kukurydzy w latach w zależności od dawek azotu – doświadczenie nienawadniane. Źródło: opracowanie własne; ^ate same oznaczenia literowe oznaczają brak istotnych różnic między kolumnami; pionowy słupek w kolumnie określa wielkość standardowego błędu średniej.

Całkowita masa N_{min} w warstwie C była istotnie i dodatnio skorelowaną z PLZ. Uzyskano następujące równanie:

$$PLZ = 5,88 + 0,4C - N_{min} \text{ dla } n = 27, R^2 = 0,51 \text{ i } p \leq 0,001$$

Masa N_{min} w glebie w warstwie 60-90 wykazał głównie zmienność w latach (ryc. 4.39). Najmniejsze wartości, niezależnie od kombinacji z N, odnotowano w 2020. W 2021 zaznaczył się dodatni, istotny trend wzrostowy masy N_{min} . Na kombinacji 120 kg N ha⁻¹ w stosunku do kontroli N nastąpiło podwojenie masy N_{min} , a potrojenie na kombinacji 160 kg N ha⁻¹. W 2022 prawie 2- krotny w stosunku do kontroli N. wzrost masy N względem kontroli N odnotowano prawie 2-krotny wzrost masy N na kombinacji 120 kg N ha⁻¹. Dalszy wzrost dawki N spowodował nieznaczny spadek masy N_{min} . w glebie.



Ryc. 4.39. Masa N_{min} w warstwie 60-90 cm gleby w stadium BBCH 61 kukurydzy w latach w zależności od dawek azotu – doświadczenie nienawadniane.

Źródło: opracowanie własne; ^ate same oznaczenia literowe oznaczają brak istotnych różnic między kolumnami; pionowy słupek w kolumnie określa wielkość standardowego błędu średniej.

Tabela 4.17. Azot mineralny (N_{\min}) w glebie w stadium BBCH 61 kukurydzy – doświadczenie nienawadniane.

Czynnik	Poziom czynnika	A-NH ₄	B-NH ₄	C-NH ₄	A-NO ₃	B-NO ₃	C-NO ₃	A-N _{min}	B-N _{min}	C-N _{min}	N _{min61}
		kg N ha ⁻¹									
Lata (L)	2020	3,0 ^c	2,6 ^b	1,7 ^b	5,5 ^b	4,8 ^b	13,8 ^c	8,5 ^c	7,4 ^b	15,5 ^b	31,4 ^b
	2021	12,1 ^b	17,1 ^a	29,0 ^a	6,9 ^b	14,0 ^a	19,5 ^b	19,0 ^b	31,1 ^a	48,5 ^a	98,6 ^a
	2022	16,4 ^a	15,8 ^a	27,2 ^a	14,2 ^a	13,4 ^a	26,1 ^a	30,6 ^a	29,2 ^a	53,3 ^a	113,0 ^a
F _{ob} , P		111***	28,0***	64,0***	67,0***	55,4***	44,2***	144***	49,0***	81,2***	92,3***
Systemy nawożenia siarką (SYS)	NPK	9,1 ^b	13,2	19,7	9,3 ^{ab}	13,0 ^a	20,7 ^{ab}	18,4	26,2	40,4	85,0
	NPK-S ⁰	8,8 ^b	9,9	16,1	10,0 ^a	10,2 ^b	21,0 ^a	18,8	20,1	37,2	76,0
	NPK-CaSO ₄	13,5 ^a	12,4	22,0	7,3 ^b	9,0 ^b	17,7 ^b	20,9	21,4	39,7	82,0
F _{ob} , P		16,6***	1,3 ^{ns}	2,4 ^{ns}	5,5**	8,8***	3,8*	2,1 ^{ns}	3,0 ^{ns}	0,6 ^{ns}	1,0 ^{ns}
Dawki azotu (ND) kg N ha ⁻¹	0	6,7 ^b	4,0 ^b	9,2 ^b	4,4 ^c	7,5 ^c	16,4 ^b	11,2 ^c	11,5 ^b	25,5 ^b	48,2 ^b
	120	12,2 ^a	15,3 ^a	23,8 ^a	9,6 ^b	10,3 ^b	18,6 ^b	21,8 ^b	25,6 ^a	42,5 ^a	89,9 ^a
	160	12,6 ^a	16,3 ^a	24,8 ^a	12,5 ^a	14,3 ^a	24,4 ^a	25,1 ^a	30,6 ^a	49,3 ^a	104,9 ^a
F _{ob} , P		25,5***	20,4***	21,1***	50,7***	24,2***	20,1***	62,4***	27,7***	28,5***	41,9***
Średnia		12,8	19,5	217,1	1406	183,2	13,6	19,4	22,6	39,1	81,0
OSD		3,5	8,5	195,7	1370	168,5	6,6	6,7	8,4	12,0	26,4
WZ, %		27,4	43,5	90,1	97,5	92,0	48,9	34,4	37,2	30,7	32,6

Źródło: opracowanie własne; ***, **, * - istotność na poziomie 0,001; 0,01; 0,05; ns – brak istotnego działania czynnika; OSD – odchylenie standardowe; WZ – współczynnik zmienności; ^a – ta sama litera w rzędzie oznacza brak istotnego zróżnicowania cechy w kolumnie dla danego czynnika; A, B, C – warstwy gleby, odpowiednio: 0-30, 30-60; 60-90 cm; NO₃ → N-NO₃ – azot azotanowy; NH₄ → N-NH₄ – azot amonowy.

4.9b. Doświadczenie nawadnianie

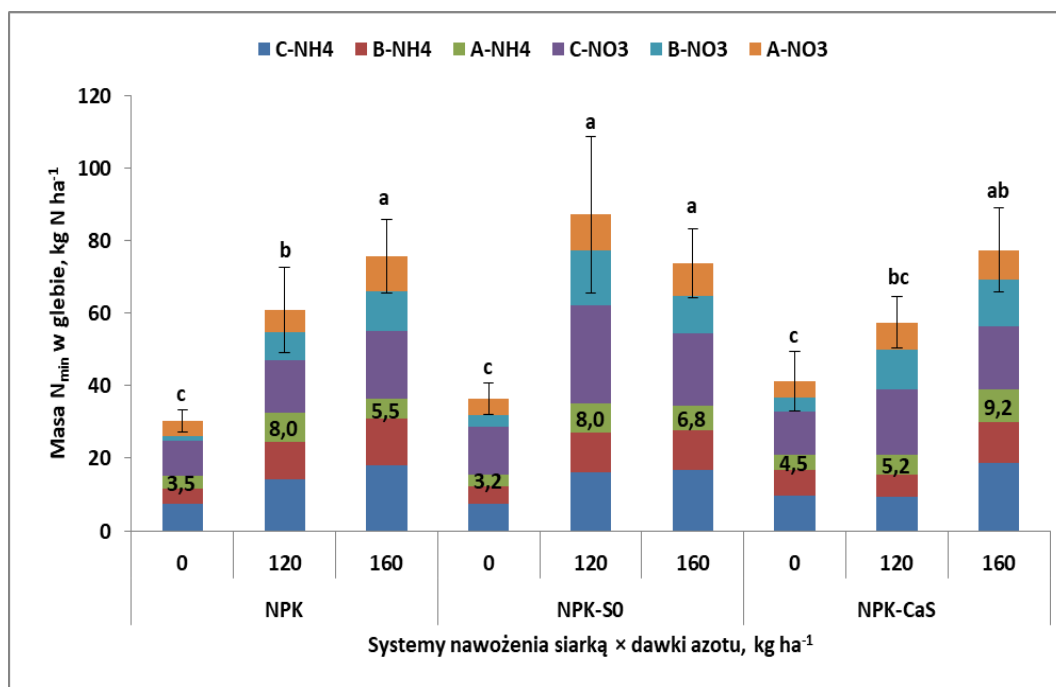
Masa N_{\min} w stadium BBCH 61 kukurydzy dla wszystkich analizowanych cech wykazała reakcję na współdziałanie Lata \times SYS \times ND (zał. 4.18a). Wartości współczynnika zmienności (WZ) dla analizowanych cech wykazały zindywidualizowaną dużą zmienność (tab. 4.18). Jedynie A- NO_3 i C- N_{\min} mieściły się w zakresie umiarkowanej zmienności (15-35%). Największa zmienność, lecz wykazującą spadkowy trend z głębokością gleby, odnotowano dla N- NH_4 . Zmienność N- NO_3 w głębszych warstwach gleby była większa, niż w warstwie A.

Podstawowym czynnikiem wywołującym zmienność analizowanych cech N_{\min} były lata (tab. 4.18). Masa N- NH_4 była najmniejsza w 2020, a do tego zmniejszała się wraz z głębokością. Całkowicie odmienny trend odnotowano w 2021, w którym masa N- NH_4 była zarówno największa, jak i wyraźnie wzrastała w kolejnych warstwach gleby. Różnice między 2020 i 2021 także wzrastały wraz z głębokością gleby. W 2022, masa N- NH_4 była istotnie i znacznie mniejsza w porównaniu do poprzednich lat. Wpływ systemów nawożenia siarką na masę N- NH_4 był nieistotny. Natomiast dawki azotu istotnie kształtowały wartość tej cechy w każdej warstwie gleby, prowadząc do progresywnego wzrostu N- NH_4 wraz dawkami N.

Masa N- NO_3 była zmienna w latach, a największe wartości odnotowano w 2021. Natomiast niezależnie od lat, największe wartości tej cechy stwierdzono w warstwie C. Istotny wpływ systemów nawożenia siarką ujawnił się tylko w warstwach B i C. W warstwie B nawożenie siarką, niezależnie od formy, istotnie zwiększało masę N- NO_3 . W warstwie C zaznaczyła się wyraźna dominacja działania S^0 . Dawki azotu istotnie zwiększały masę tego składnika, lecz tylko w odniesieniu do kontroli N.

Masa całkowita N_{\min} w glebie w stadium BBCH 61 w porównaniu do stanu w stadium BBCH 15 kukurydzy była średnio 2-krotnie mniejsza (tab. 16 i 18). Cecha ta istotnie zależała od współdziałania Lata \times SYS \times ND (zał. 4.18a). Czynnikiem kształtującym masę N w glebie, uśredniając dla lat, były dawki N. Wartości N_{\min} zwiększały się zgodnie z wielkością stosowanych dawek (ryc. 4.40). Masa N_{\min} na kombinacjach 120 i 160 kg N ha⁻¹ w stosunku do kontroli N podlegała istotnym modyfikacjom w zależności od systemu nawożenia siarką. Na NPK zwiększyła się odpowiednio o 100% i 150%. Na NPK-S0 odnotowano nie tylko większą wartość na kontroli N, lecz także większy względny wzrost, kształtujący się jak 142% i 105%, odpowiednio dla kombinacji 120 i 160 kg N ha⁻¹. Na obiekcie NPK-CaS odnotowano

istotnie większą masę N_{\min} w stosunku do NPK, lecz względny wzrost na kombinacjach z azotem kształtował się odpowiednio, jak 39% i 88%.



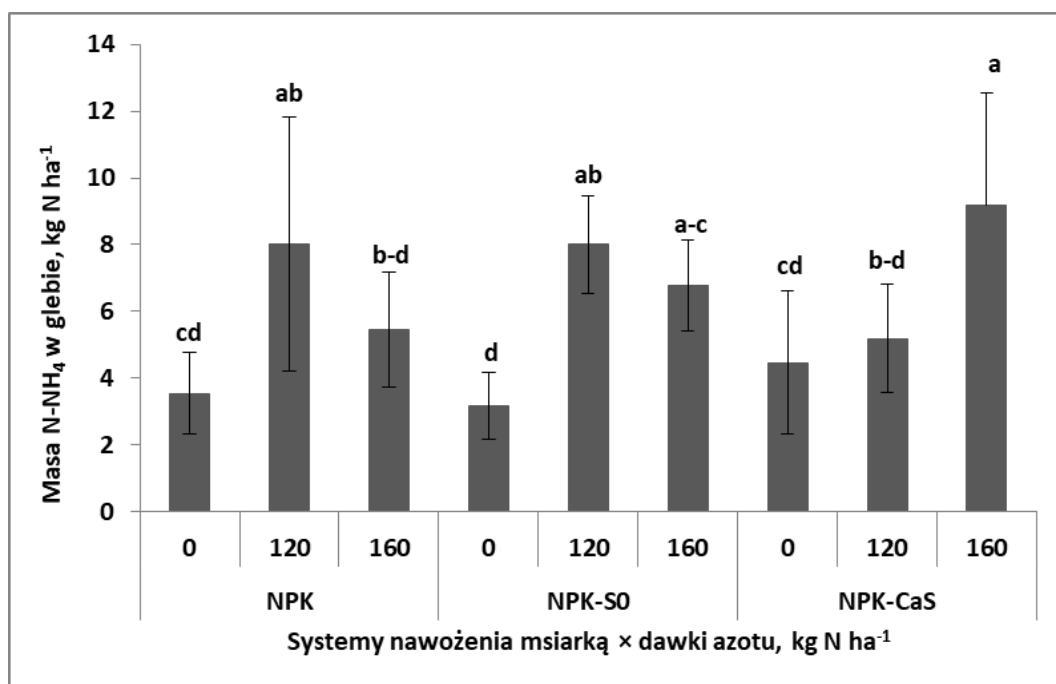
Ryc. 4.40. Masa i struktura rozmieszczenia form N_{\min} w warstwie 0-90 cm gleby w stadium BBCH 61 kukurydzy w zależności od systemów nawożenia siarką i dawek azotu – doświadczenie nawadniane.

Źródło: opracowanie własne; ^ate same oznaczenia literowe oznaczają brak istotnych różnic między kolumnami; pionowy słupek w kolumnie określa wielkość standardowego błędu średniej. 18,4 – diagnostyczna dla plonu warstwa gleby. 3,5 – diagnostyczna dla plonu warstwa gleby.

Największą masę N_{\min} w glebie stwierdzono w warstwie C dla obu form N_{\min} , która stanowiła 22,1% (N-NH₄) i 28,5% (N-NO₃) (ryc. 4.40 i ryc. Z4.30). Masa N w tej warstwie określała w największym stopniu całkowitą masę N_{\min} w glebie ($r = 0,99^{***}$, zał. 4.18b). Masa obu form N_{\min} była mniejsza w warstwie B, a następnie w A, stanowiąc odpowiednio 14,4% i 13% oraz 10,1% i 11,9% całej masy składnika w glebie. Struktura udziału obu form była zmienna, zależnie od systemu nawożenia siarką i dawek N. Na obiekcie NPK udział obu form był wysoce zrównoważony i kształtował się na poziomie 50%. Na obiekcie NPK-S0 zaznaczyła się dominacja N-NO₃, która ujawniła się najsilniej na kombinacji 120 kg N ha⁻¹. Na obiekcie NPK-CaS równoważny udział obu form ujawnił się na kontroli N i kombinacji 160 kg N ha⁻¹. Natomiast na kombinacji 120 kg N ha⁻¹ zdecydowanie dominował N-NO₃ (64%).

Spośród 10 analizowanych cech, tylko dwie wykazały istotny i dodatni wpływ na plon ziarna kukurydzy w stadium BBCH 61 (zał. 4.18a.). Przeprowadzona analiza regresji krokowej wykazała, że główną formą warunkującą PLZ w omawianym stadium rozwoju kukurydzy była masa N-NH₄ w warstwie A, lecz działanie tej cechy było

nieistotne ($R^2 = 0,1$, $p = 0,06$). Jednakże odnotowano istotny wpływ tej cechy na LZR ($r = 0,57^{**}$) i MTZ ($r = 0,47^*$). Masa N-NH₄ w warstwie A wykazała istotną reakcję na współdziałanie SYS × ND (ryc. 4.41). Masa N na obiekcie NPK była istotnie większa na kombinacjach nawożonych azotem. Na kombinacji 120 kg N ha⁻¹ uległa podwojeniu a na kombinacji 160 kg N ha⁻¹ zwiększyła się o 57% w stosunku do kontroli N. Na obiekcie NPK-S0 odnotowano ten sam trend, lecz wzrost masy składnika okazał się odpowiednio 2,5-krotny i ponad 2-krotny. Na obiekcie NPK-CaS odnotowano istotny wzrost masy N w reakcji na większą dawkę azotu, na której nastąpiło podwojenie w stosunku do kontroli N.



Ryc. 4.41. Masa azotu amonowego (A-NH₄) w warstwie 0-30 cm gleby w stadium BBCH 61 kukurydzy w zależności od systemu nawożenia siarką i dawek azotu – doświadczenie nawadniane.

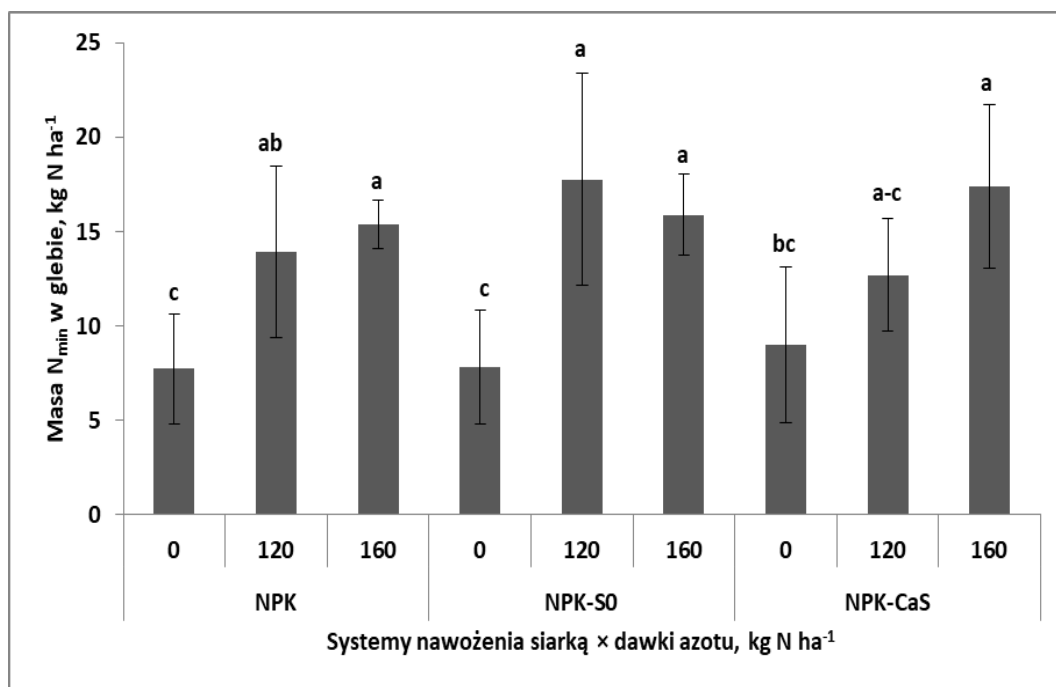
Źródło: opracowanie własne; *te same oznaczenia literowe oznaczają brak istotnych różnic między kolumnami; pionowy słupek w kolumnie określa wielkość standardowego błędu średniej.

Masa N_{min} w warstwie A wykazała istotny, aczkolwiek niewielki związek z plonem ziarna kukurydzy (zał. 4.18b). Uzyskane na podstawie analizy regresji krokowej równanie przedstawia się następująco:

$$PLZ = 7,59 + 0,12A - N_{min} \text{ dla } n = 54 \text{ } R^2 = 0,17 \text{ i } p \leq 0,01$$

Cecha ta wykazała istotny związek z elementami struktury plonu, takimi jak LZR, LZK i MTZ. Z przeprowadzonej analizy regresji krokowej wynika, że zmienność MTZ w 28% zależała od zmienności A-N_{min}. Masa N_{min} na kontroli N dla wszystkich systemów

nawożenia siarką kształtowała się na podobnym poziomie. Masa N_{\min} w warstwie A wzrastała wraz ze wzrostem dawki N. Na obiektach NPK i NPK-CaS wzrost ten był zgodny z wielkością stosowanych dawek azotu. Na obiekcie NPK-S⁰ odnotowano największy, ponad 2-krotny wzrost masy N na kombinacji 120 kg N ha⁻¹. Dalszy wzrost dawki azotu spowodował nieznaczny spadek masy N w glebie (ryc. 4.42).



Ryc. 4.42. Masa N_{\min} w warstwie 0-30 cm gleby w stadium BBCH 61 kukurydzy w zależności od systemu nawożenia siarką i dawek azotu – doświadczenie nawadniane. Źródło: opracowanie własne; ^ate same oznaczenia literowe oznaczają brak istotnych różnic między kolumnami; pionowy słupek w kolumnie określa wielkość standardowego błędu średniej.

Tabela 4.18. Azot mineralny (N_{\min}) w glebie w stadium BBCH 61 kukurydzy – doświadczenie nawadniane.

Czynnik	Poziom czynnika	A-NH ₄	B-NH ₄	C-NH ₄	A-NO ₃	B-NO ₃	C-NO ₃	A-N _{min}	B-N _{min}	C-N _{min}	N _{min65}
		kg N ha ⁻¹									
Lata (L)	2020	3,2 ^c	2,3 ^c	2,0 ^c	4,9 ^b	6,1 ^b	15,1 ^b	8,1 ^c	8,4 ^b	17,1 ^c	33,5 ^c
	2021	8,5 ^a	19,6 ^a	27,2 ^b	8,3 ^a	15,1 ^a	22,5 ^a	16,8 ^a	34,7 ^a	49,8 ^a	101,3 ^a
	2022	6,2 ^b	4,0 ^b	10,2 ^a	8,1 ^a	4,3 ^c	12,5 ^c	14,3 ^b	8,3 ^b	22,7 ^b	45,3 ^b
F _{ob, P}		40,3 ^{***}	354,4 ^{***}	278,5 ^{***}	15,7 ^{***}	74,3 ^{***}	47,8 ^{***}	43,6 ^{***}	282 ^{***}	210 ^{***}	248 ^{***}
Systemy nawożenia siarką (SYS)	NPK	5,7	9,0	13,3	6,7	6,7 ^b	14,2 ^b	12,3	15,7	27,6 ^b	55,6 ^b
	NPK-S ⁰	6,0	8,9	13,5	7,8	9,5 ^a	20,1 ^a	13,8	18,4	33,6 ^a	65,8 ^a
	NPK-CaSO ₄	6,3	8,0	12,7	6,7	9,3 ^a	15,7 ^b	13,0	17,3	28,4 ^b	58,7 ^{ab}
F _{ob, P}		0,5 ^{ns}	1,1 ^{ns}	0,3 ^{ns}	1,8 ^{ns}	5,3 ^{**}	16,5 ^{***}	1,2 ^{ns}	2,2 ^{ns}	7,3 ^{**}	5,2 ^{**}
Dawki azotu (ND) kg N ha ⁻¹	0	3,7 ^b	5,3 ^c	8,3 ^c	4,5 ^b	2,8 ^b	11,4 ^b	8,2 ^b	8,1 ^b	19,7 ^b	36,0 ^b
	120	7,1 ^a	9,0 ^b	13,3 ^b	7,7 ^a	11,3 ^a	20,0 ^a	14,8 ^a	20,4 ^a	33,3 ^a	68,4 ^a
	160	7,1 ^a	11,6 ^a	17,9 ^a	9,1 ^a	11,3 ^a	18,7 ^a	16,2 ^a	22,9 ^a	36,6 ^a	75,7 ^a
F _{ob, P}		22,1 ^{***}	38,4 ^{***}	38,9 ^{***}	23,9 ^{***}	53,7 ^{***}	37,0 ^{***}	40,3 ^{***}	75,9 ^{***}	54,8 ^{***}	84,7 ^{***}
Średnia		48,4	10,9	11,4	6,6	12,7	13,6	10,7	17,1	29,8	60,0
OSD		67,6	5,4	5,8	1,8	6,5	5,4	3,9	8,6	9,9	21,1
WZ,%		139,8	49,7	50,7	27,6	51,4	39,5	36,0	50,3	33,3	35,2

Źródło: opracowanie własne; ***, **, * - istotność na poziomie 0,001; 0,01; 0,05; ns – brak istotnego działania czynnika; OSD – odchylenie standardowe; WZ – współczynnik zmienności; ^a – ta sama litera w rzędzie oznacza brak istotnego zróżnicowania cechy w kolumnie dla danego czynnika; A, B, C – warstwy gleby, odpowiednio: 0-30, 30-60; 60-90 cm; NO₃ → N-NO₃ – azot azotanowy; NH₄ → N-NH₄ – azot amonowy.

4.10. Azot mineralny w glebie – stadium BBCH 89

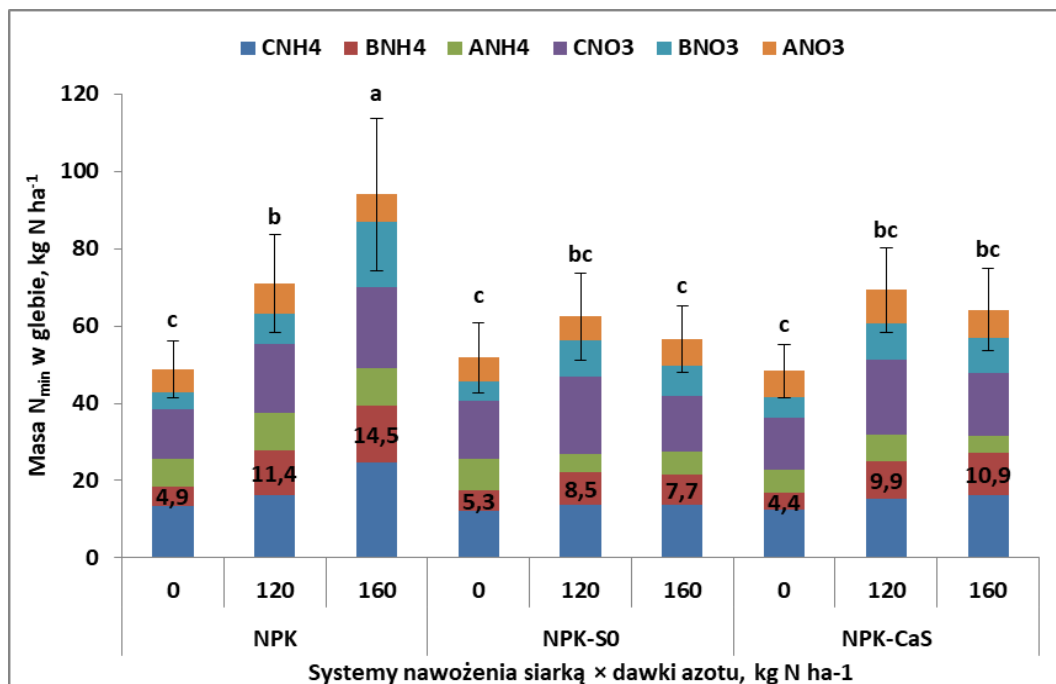
4.10a. Doświadczenie nienawadniane

Masa N_{\min} w stadium kukurydzy BBCH 61 w doświadczeniu nienawadnianym dla wszystkich analizowanych cech zależała od współdziałania Lata \times SYS \times ND (zał. 4.19a). Wartości współczynnika zmienności (WZ) wykazały dużą zmienność analizowanych cech, przekraczającą znacznie wartość 35% (tab. 4.19). Największą zmienność odnotowano dla warstwy B, w której wartość WZ dla N-NO₃ przekroczyła 90%.

Głównym czynnikiem wywołującym zmienność N w glebie były, jak i w poprzednich terminach badań, Lata (tab. 4. 15 i 4.17). Masa N-NH₄ w każdej warstwie gleby była najmniejsza w 2020. W pozostałych latach była istotnie i wielokrotnie większa. Nie stwierdzono różnic między 2021 i 2022. Odnotowano istotny wpływ systemów nawożenia siarka na wartość omawianej cechy. W każdej warstwie gleby stwierdzono mniejszą masę N-NH₄, zwłaszcza na obiekcie NPK-S0. Istotny wpływ dawek N na wartość omawianej cechy odnotowano tylko dla warstw B i C. W warstwie B istotną różnicę zanotowano tylko między kontrolą N a kombinacjami z N, na których masa N-NH₄ była, co najmniej 2-krotnie większa. W warstwie C masa N była większa, niż w górnych warstwach gleby, a istotną różnicę względem kontroli N odnotowano tylko na kombinacji 160 kg N ha⁻¹. Masa N-NO₃ wykazała podobne trendy, jak N-NH₄, lecz w warstwach B i C różnice w latach były znacznie większe. Masa składnika była największa w 2021, a najmniejsza w 2020. Istotny wpływ systemów nawożenia siarką odnotowano tylko w warstwie B, w której istotnie mniejsze wartości stwierdzono na obiektach z siarką. Działanie dawek N ujawniło się także tylko w tych dwóch warstwach. W warstwie B masa N wzrastała progresywnie z dawkami N. W warstwie C masa N-NO₃ była znacznie większa, niż w warstwach powierzchniowych, lecz istotna różnica zachodziła tylko między kontrolą N a kombinacjami nawożonymi N.

Całkowita masa N_{\min} w glebie istotnie zależała od współdziałania Lata \times SYS \times ND (zał. 4.19a). Stan masy N_{\min} w stadium BBCH 89 przedstawiono analogicznie, jak w latach poprzednich, czyli dla współdziałanie SYS \times ND, a standardowy błąd średniej odzwierciedla działanie czynnika Lat (ryc. 4.43). Na kontroli N, różnice między systemami nawożenia siarką były nieistotne, wahając się poziomie 50 kg N ha⁻¹. Tylko na obiekcie NPK zachodził progresywny wzrost masy N w reakcji na wzrastające dawki N. W stosunku do kontroli N wzrost ten na kombinacjach nawożonych 120 i 160

kg N ha⁻¹ wynosił odpowiednio 35% i 92%. Na obiekcie NPK-S0 względny przyrost masy składnika kształtowała się, jak 21% i 10% a na NPK-CaS, jak 44% i 33%.



Ryc. 4.43. Masa i rozmieszczenia form N_{min} w warstwach gleby w stadium BBCH 89 kukurydzy w zależności od systemów nawożenia siarką i dawek azotu – doświadczenie nienawadniane

Źródło: opracowanie własne; *te same oznaczenia literowe oznaczają brak istotnych różnic między kolumnami; pionowy słupek w kolumnie określa wielkość standardowego błędu średniej. 4,9 – diagnostyczna dla plonu warstwa gleby.

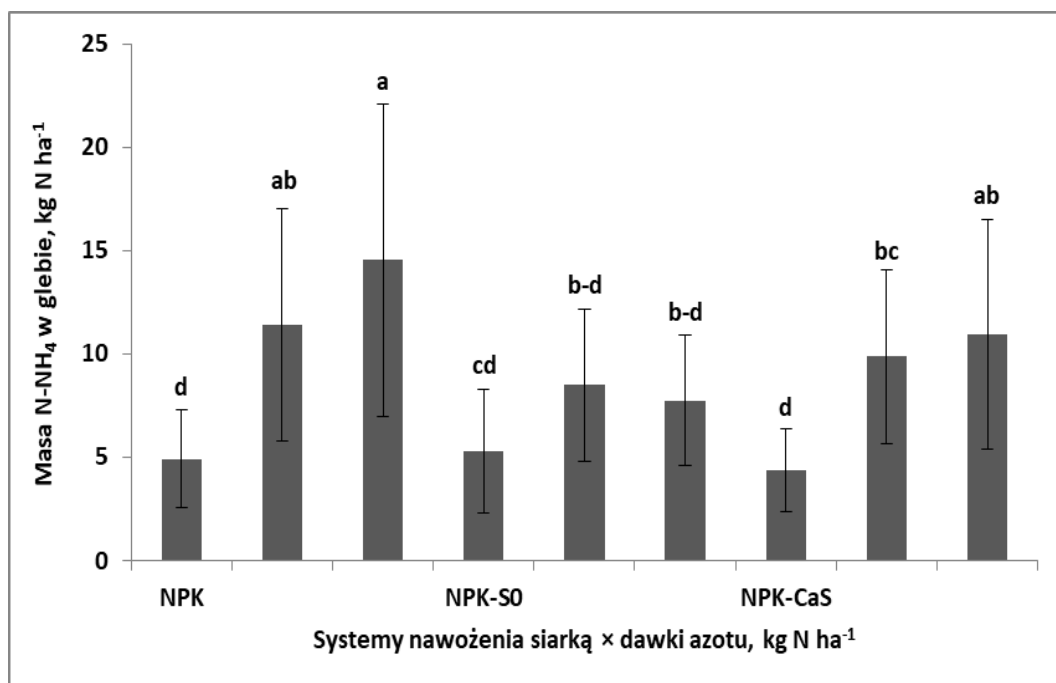
Szczegółowa analiza rozmieszczenia i udziału poszczególnych form N_{min} w glebie wykazała dominację składnika w warstwie C (ryc. 4.43). Udział $N-NH_4$ i $N-NO_3$ w całkowitej masie N_{min} był zbliżony i stanowił odpowiednio 24% i 27% (ryc. Z. 4.31). W warstwach A i B udział obu tych form N_{min} był podobny, stanowiąc odpowiednio 11% i 13% masy N_{min} . Względny udział obu form N_{min} w zależności od dawek N w systemach nawożenia siarką był bardzo zbliżony, kształtując się ogólnie na poziomie 50%. Na NPK nieznacznie dominował $N-NH_4$ (53%). Na obiektach z siarką natomiast przeważał udział $N-NO_3$, co najwyraźniej zaznaczyło się na kombinacji 120 kg N ha⁻¹. Całkowita masa N_{min} wykazała bardzo silny związek korelacyjny z wieloma cechami podstawowymi (formy i warstwy), lecz najsilniejszy odnotowano dla B- NH_4 i C- NH_4 ($r = 0,96^{***}$ i $0,97^{***}$, odpowiednio). Z grupy cech zagregowanych największa wartość współczynnika korelacji odnotowano dla warstwy C ($r = 0,99^{***}$).

Wszystkie cechy, związane z N_{min} i analizowane w stadium BBCH 89, wykazały istotne związki korelacyjne z plonem ziarna kukurydzy (zał. 4.19b). Największą

wartość współczynnika korelacji uzyskano dla B-NH₄ ($r = 0,65^{***}$). Predykcyjną rolę tej formy N w warstwie B potwierdziła przeprowadzona analiza regresji krokowej. Uzyskane równanie przedstawia się następująco:

$$PLZ = 6,45 + 0,103B - NH_4 \text{ dla } R^2 = 0,39 \text{ i } p \leq 0,001$$

Zatem zmienność masy N-NH₄ w warstwie B w stadium BBCH 89 kukurydzy tłumaczy w 39% zmienność plonu ziarna. Tak duże oddziaływanie tej cechy na plon zostało potwierdzone istotnymi wartościami związków korelacyjnych z LZR, LZK i MTZ ($p \leq 0,001$) i w mniejszym stopniu LZ ($p \leq 0,05$). Masa N-NH₄ w warstwie B istotnie zależała od współdziałania Lata \times SYS \times ND (zał. 4.19a). Zmienność w latach była duża, co jednoznacznie podkreślają wartości standardowego błędu średniej. Masa składnika na obiekcie NPK była średnio największa, lecz istotnie wzrastała wraz z dawkami N (ryc. 4.44). Na kombinacji 120 kg N ha⁻¹ uległa podwojeniu, zwiększając się o 132%, a potrojeniu na kombinacji 160 kg N ha⁻¹ (195%). Na obiekcie NPK-S0 masa N-NH₄ na kontroli N była nieznacznie większa, niż na NPK, a wzrost na kombinacjach nawożonych azotem był mniejszy, wynosząc odpowiednio 60% i 45%. Na obiekcie NPK-CaS, a względny wzrost masy N-NH₄ wyniósł 125% i 148%.



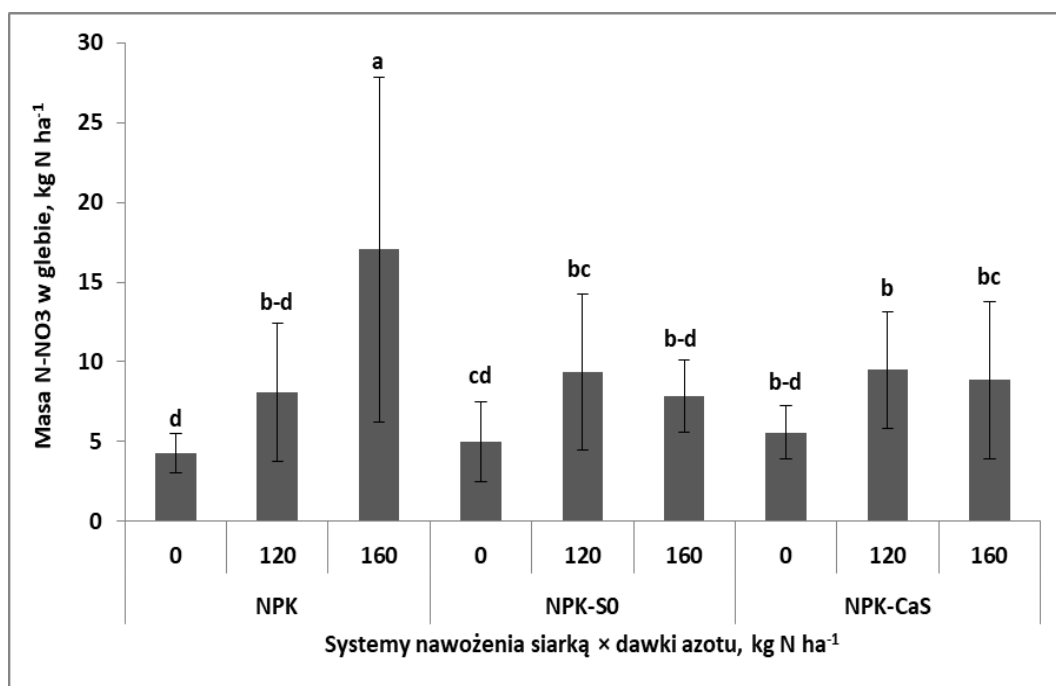
Ryc. 4.44. Wpływ systemów nawożenia siarką i dawek azotu na masę N-NH₄ w warstwie 30-60 cm (B-NH₄) gleby w stadium BBCH 89 kukurydzy - doświadczenie nienawadniane.

Źródło: opracowanie własne; ^ate same oznaczenia literowe oznaczają brak istotnych różnic między kolumnami; pionowy słupek w kolumnie określa wielkość standardowego błędu średniej.

Trzy podstawowe elementy, to znaczy LZR, LZK i MTZ wykazały, jak wynika z analizy regresji krokowej, istotny związek z masą N-NO₃ w warstwie B. Stopień związku z LZK dla N-NO₃ przedstawia równanie:

$$LZK = 325 + 6,83B - NO_3 \text{ dla } R^2 = 0,52 \text{ i } p \leq 0,01$$

Uzyskane równanie informuje, że zmienność masy B-NO₃ w 52% determinowała zmienność LZK. Wartość tej cechy określało współdziałanie Lata × SYS × ND (zał. 4.19a). Masa B-NO₃ na kontroli N wykazywała trend wzrostowy w kierunku NPK < NPK-S0 < NPK-CaS (ryc. 4.45). Zastosowanie N prowadziło do wzrostu masy N-NO₃, lecz zmiennie dla systemów nawożenia siarką. Progresywny wzrost odnotowano tylko na obiekcie NPK, na którym masa N zwiększyła się 2- i 4-krotnie na kombinacjach 120 i 160 kg N ha⁻¹ w stosunku do kontroli N. Na obiektach z siarką odnotowano istotny wzrost, podwojenie masy N, lecz tylko w stosunku do kontroli N na danym obiekcie.



Ryc. 4.45. Wpływ systemów nawożenia siarką i dawek azotu na masę N-NO₃ w warstwie 30-60 cm gleby (B-NO₃) – doświadczenie nienawadniane.

Źródło: opracowanie własne; ^ate same oznaczenia literowe oznaczają brak istotnych różnic między kolumnami; pionowy słupek w kolumnie określa wielkość standardowego błęd średniej.

Tabela 4.19. Azot mineralny (N_{\min}) w glebie w stadium BBCH 89 kukurydzy – doświadczenie nienawadniane.

Czynnik	Poziom czynnika	A-NH ₄	B-NH ₄	C-NH ₄	A-NO ₃	B-NO ₃	C-NO ₃	A-N _{min}	B-N _{min}	C-N _{min}	N _{min89}
		kg N ha ⁻¹									
Lata (L)	2020	1,0 ^b	0,9 ^b	2,6 ^b	1,6 ^b	2,1 ^c	10,5 ^c	2,6 ^b	3,0 ^c	13,1 ^c	18,6 ^c
	2021	9,8 ^a	13,2 ^a	22,3 ^a	9,2 ^a	15,7 ^a	23,8 ^c	19,0 ^a	29,0 ^a	46,0 ^a	94,0 ^a
	2022	10,3 ^a	11,8 ^a	21,2 ^a	10,0 ^a	7,3 ^b	15,6 ^b	20,2 ^a	19,1 ^b	36,8 ^b	76,2 ^b
F _{ob, P}		133***	131***	154***	103***	151***	72,3***	175***	172***	154***	259***
Systemy nawożenia siarką (SYS)	NPK	9,0 ^a	10,3 ^a	18,2 ^a	6,8	9,8 ^a	17,2	15,8 ^a	20,1 ^a	35,4 ^a	71,3 ^a
	NPK-S ⁰	6,2 ^b	7,2 ^b	13,2 ^b	6,5	7,4 ^b	16,4	12,7 ^b	14,6 ^b	29,6 ^b	57,0 ^b
	NPK-CaSO ₄	5,8 ^b	8,4 ^{ab}	14,6 ^b	7,5	8,0 ^{ab}	16,3	13,3 ^{ab}	16,4 ^b	30,9 ^{ab}	60,6 ^b
F _{ob, P}		14,3***	7,1**	8,2***	1,3 ^{ns}	5,0**	0,4 ^{ns}	4,8*	7,9***	4,8*	9,2***
Dawki azotu (ND) kg N ha ⁻¹	0	7,2	4,9 ^b	12,7 ^b	6,3	5,0 ^c	13,7 ^b	13,5	9,8 ^c	26,4 ^b	49,6 ^b
	120	7,1	9,9 ^a	15,1 ^b	7,4	9,0 ^b	19,0 ^a	14,5	18,9 ^b	34,1 ^a	67,6 ^a
	160	6,7	11,1 ^a	18,3 ^a	7,1	11,2 ^a	17,2 ^a	13,8	22,3 ^a	35,5 ^a	71,6 ^a
F _{ob, P}		0,8 ^{ns}	31,3***	10,0***	1,7 ^{ns}	32,3***	11,7***	0,6 ^{ns}	41,6***	12,9***	22,8***
Średnia		7,0	8,6	15,4	6,9	8,4	16,6	13,9	17,0	32,0	62,9
OSD		5,3	7,2	10,7	4,3	7,9	7,5	9,2	14,5	17,2	38,8
WZ, %		75,1	83,8	69,6	62,6	94,1	45,2	65,7	85,3	53,9	61,6

Źródło: opracowanie własne; ***, **, * - istotność na poziomie 0,001; 0,01; 0,05; ns – brak istotnego działania czynnika; OSD – odchylenie standardowe; WZ – współczynnik zmienności; ^a – ta sama litera w rzędzie oznacza brak istotnego zróżnicowania cechy w kolumnie dla danego czynnika; A, B, C – warstwy gleby, odpowiednio: 0-30, 30-60; 60-90 cm; NO₃ → N-NO₃ – azot azotanowy; NH₄ → N-NH₄ – azot amonowy.

4.10b. Doświadczenie nawadniane

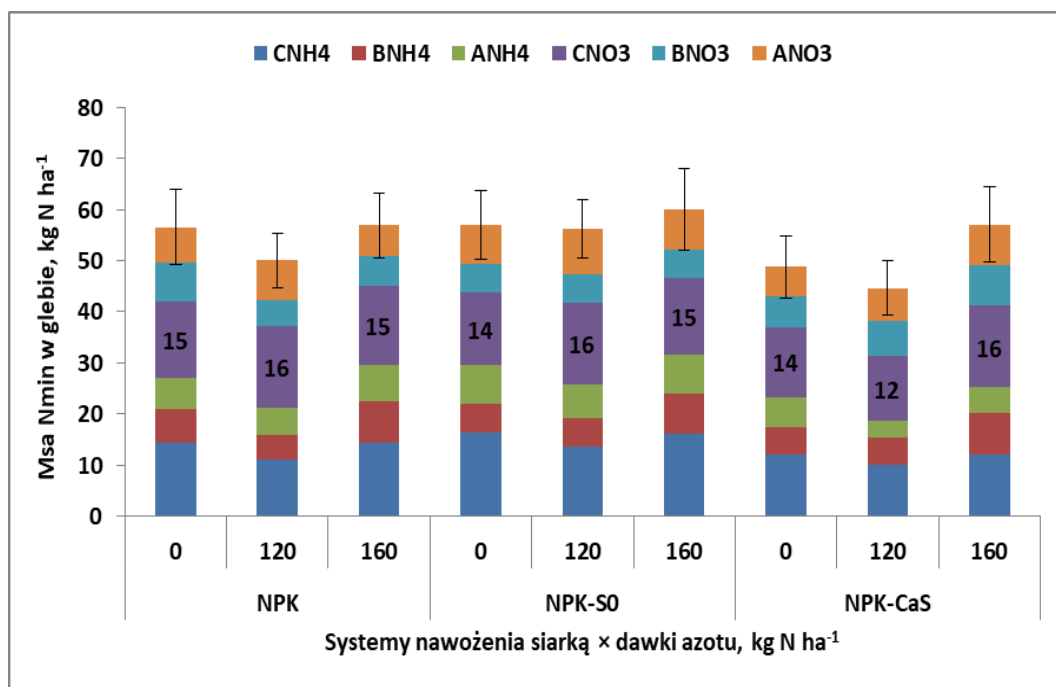
Masa N_{\min} w stadium BBCH 89 kukurydzy w doświadczeniu nawadnianym tylko dla A- NO_3 i C- NO_3 zależała od współdziałania Lata \times SYS \times ND (zał. 4.20a). Pięć kolejnych cech wykazało zależność od współdziałania Lata \times ND (B- NH_4 , C- NH_4 , B- N_{\min} , B- N_{\min} i N_{\min} 89). Wartości trzech kolejnych cech, jak A- NH_4 , B- NO_3 i A- N_{\min} zależały od współdziałania Lata \times SYS. Wartości WZ wykazały umiarkowany poziom zmienności tylko dla czterech badanych cech (15-35%). Najmniejszą zmienność, wynoszącą zaledwie 17%, odnotowano dla C- N_{\min} . Dla pozostałych wartości WZ przekroczyły 35% (tab. 4.20).

Lata były największą przyczyną zmienności masy form N_{\min} w glebie w stadium BBCH 89 (tab. 4.20). Różnice między tymi latami były wielokrotne. Masa N- NH_4 była zdecydowanie najmniejsza w 2020. W 2021 była największa i wzrastała z głębokością. ten sam trend, lecz dla mniejszych wartości odnotowano w 2022. Wpływ systemów nawożenia siarka ujawnił się tylko w warstwie A i C. Istotnie większą masę N notowano w glebie traktowanej S^0 . Wpływ dawek N zaznaczył się najbardziej wyraźnie w glebie nawożonej 160 kg N ha^{-1} , zwłaszcza w warstwie B, w której odnotowano istotnie większe wartości niż dla pozostałych kombinacji N. Trend N- NO_3 był analogiczny w latach, jak odnotowany dla N- NH_4 . Dominacja warstwy C, jak i drugiego sezonu wegetacyjnego była bardzo wyraźna. Działanie systemów nawożenia siarką zaznaczyło się tylko w warstwie A. Nieznacznie większą masę N- NH_4 notowano na obiekcie NPK-S0. Nie stwierdzono wpływu dawek N na zawartość N- NO_3 w glebie.

Całkowita masa N_{\min} w glebie w stadium BBCH 89 kukurydzy zależała istotnie od współdziałania Lata \times ND (ryc. Z4.32). Największą masę składnika stwierdzono w 2021, która była prawie 4-krotnie większa, niż w 2020 i 1,5-krotnie niż w 2022. W 2021 reakcja na nawożenie N ujawniła się tylko na kombinacji 160 kg N ha^{-1} . Natomiast w 2022 odnotowano spadek na kombinacjach z azotem. Całkowita masa N_{\min} w stadium BBCH 89 kukurydzy wykazała istotne związki korelacyjne z wartościami cech podstawowych, lecz największy związek otrzymano dla C- NH_4 ($r = 0,96^{***}$).

Strukturę rozmieszczenia i udziału form N_{\min} w glebie przedstawiono na ryc. 4.46. Z analizy danych wynika, że największą masę N w stadium BBCH 89 kukurydzy odnotowano w warstwie C. Udział C- NH_4 w całej masie N_{\min} wynosił 24% a N- NO_3 28%, co w sumie stanowi 52%. Udział pozostałych form azotu w warstwach gleby wahał się w zakresie 11-13%. W strukturze masy N nieznacznie dominował N- NO_3

(ryc. Z4.33). Na obiekcie NPK udział tej formy N_{min} wyraźnie dominował na kombinacji 120 kg N ha⁻¹, stanowiąc 58% całej puli N_{min} . Na obiekcie NPK-S0 udział obu form był zrównoważony, a dominacja N-NO₃ ujawniła się tylko na kombinacji 120 kg N ha⁻¹. Na obiekcie NPK-CaS zdecydowanie dominował udział N-NO₃, zwłaszcza na kombinacjach z azotem.



Ryc. 4.46. Masa i rozmieszczenia form N_{min} w warstwach gleby w stadium BBCH 89 kukurydzy w zależności od systemów nawożenia siarką i dawek azotu – doświadczenie nawadniane.

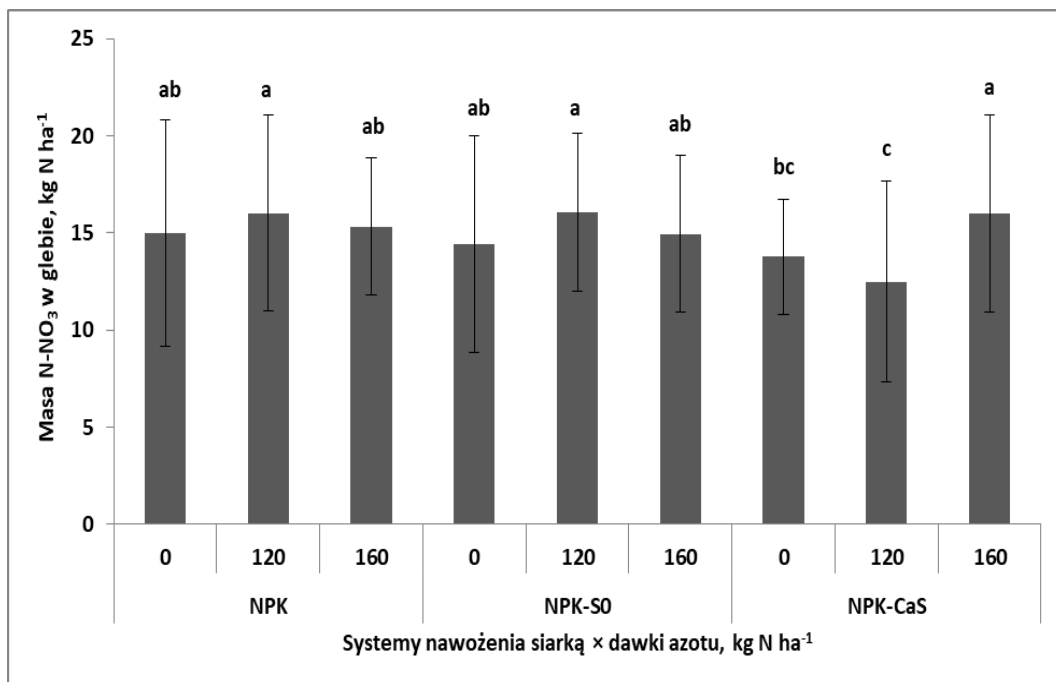
Źródło: opracowanie własne; ^ate same oznaczenia literowe oznaczają brak istotnych różnic między kolumnami; pionowy słupek w kolumnie określa wielkość standardowego błędu średniej. 15 – diagnostyczna dla plonu warstwa gleby.

Dla żadnej z analizowanych cech N_{min} nie uzyskano istotnego związku korelacyjnego z plonem ziarna (zał. 4.20). Jednakże z przeprowadzonej analizy regresji krokowej wynika, że potencjalnym predykatorem plonu ziarna była masa N-NO₃ w warstwie C (C-NO₃). Uzyskane równanie przedstawia się następująco:

$$PLZ = 26,1 + 0,155C - NO_3 \text{ dla } R^2 = 0,31 \text{ i } p \leq 0,001$$

Z równania tego wynika, że zmienność masy N-NO₃ w warstwie C gleby wyjaśnia 31% zmienności plonu ziarna kukurydzy. Cecha ta wykazała także istotny związek korelacyjny z LZR i LZK (zał. 4.20b). Masa N-NO₃ w warstwie C gleby zależała od współdziałania Lata × SYS × ND. Zawartość składnika kształtowała się na poziomie 14,9±1.2 kg N ha⁻¹, wykazując umiarkowaną zmienność w latach. Reakcję na dawki N

odnotowano tylko na NPK-CaS, w którym istotnie mniejszą masę składnika stwierdzono na kombinacji 120 kg N ha⁻¹ a największą na 160 kg N ha⁻¹ (ryc. 4.47).



Ryc. 4.47. Wpływ systemów nawożenia siarką i dawek azotu na masę N-NO₃ w warstwie 60-90 cm gleby (C-NO₃) w stadium BBCH 89 kukurydzy – doświadczenie nawadniane.

Źródło: opracowanie własne; *te same oznaczenia literowe oznaczają brak istotnych różnic między kolumnami; pionowy słupek w kolumnie określa wielkość standardowego błęd średniej.

Tabela 20. Azot mineralny (N_{\min}) w glebie w stadium BBCH 89 kukurydzy – doświadczenie nawadniane.

Czynnik	Poziom czynnika	A-NH ₄	B-NH ₄	C-NH ₄	A-NO ₃	B-NO ₃	C-NO ₃	A-N _{min}	B-N _{min}	C-N _{min}	N _{min} 89
		kg N ha ⁻¹									
Lata (L)	2020	1,3 ^c	0,8 ^c	3,8 ^c	2,0 ^c	1,5 ^c	8,0 ^c	3,2 ^c	2,3 ^c	12,4 ^b	17,9 ^c
	2021	10,7 ^a	10,4 ^a	21,2 ^b	12,9 ^a	10,5 ^a	22,8 ^a	23,6 ^a	20,9 ^a	21,9 ^a	66,4 ^a
	2022	6,3 ^b	8,0 ^b	14,8 ^a	6,8 ^b	6,7 ^b	13,9 ^b	13,1 ^b	14,7 ^b	14,8 ^b	42,7 ^b
F _{ob} , P		126***	186***	167***	159***	90,7***	89,6***	253***	184***	42,7***	302***
Systemy nawożenia siarką (SYS)	NPK	6,3 ^a	6,5	13,2 ^{ab}	6,9 ^b	6,2	15,4	13,1 ^b	12,7	16,9 ^a	42,8 ^{ab}
	NPK-S ⁰	7,3 ^a	6,3	15,3 ^a	8,1 ^a	5,5	15,1	15,4 ^a	11,9	18,0 ^a	45,2 ^a
	NPK-CaSO ₄	4,8 ^b	6,3	11,3 ^b	6,7 ^a	6,9	14,1	11,5 ^b	13,2	14,2 ^b	38,9 ^b
F _{ob} , P		9,0***	0,1 ^{ns}	8,7***	3,2*	2,2 ^{ns}	0,8 ^{ns}	9,4***	1,0 ^{ns}	6,6**	5,2**
Dawki azotu (ND) kg N ha ⁻¹	0	6,5 ^{ab}	5,9 ^b	14,2 ^a	6,7	6,4	14,4	13,2	12,3 ^{ab}	17,3 ^a	42,8 ^{ab}
	120	5,2 ^b	5,2 ^b	11,5 ^b	7,7	5,9	14,8	12,8	11,0 ^b	14,5 ^b	38,3 ^b
	160	6,6 ^a	8,1 ^a	14,1 ^a	7,3	6,4	15,4	13,9	14,5 ^a	17,4 ^a	45,8 ^a
F _{ob} , P		3,7*	16,7***	5,0**	1,3 ^{ns}	0,5 ^{ns}	0,4 ^{ns}	0,7 ^{ns}	6,3**	4,9**	7,3**
Średnia		6,1	6,4	13,3	7,2	6,2	14,9	13,3	12,6	16,4	42,3
OSD		2,5	2,6	4,6	2,8	2,3	3,7	5,2	4,8	2,8	12,4
WZ, %		40,6	40,9	34,4	38,4	36,8	25,1	39,0	38,3	17,0	29,2

Źródło: opracowanie własne; ***, **, * - istotność na poziomie 0,001; 0,01; 0,05; ns – brak istotnego działania czynnika; OSD – odchylenie standardowe; WZ – współczynnik zmienności; ^a – ta sama litera w rzędzie oznacza brak istotnego zróżnicowania cechy w kolumnie dla danego czynnika; A, B, C – warstwy gleby, odpowiednio: 0-30, 30-60; 60-90 cm; NO₃ → N-NO₃ – azot azotanowy; NH₄ → N-NH₄ – azot amonowy.

4.11. Akumulacja azotu przez kukurydzę w sezonie wegetacyjnym

4.11a. Doświadczenie nienawadniane

Z ośmiu cech i wskaźników akumulacji azotu przez kukurydzę w sezonie wegetacyjnym cztery wykazały reakcję na współdziałanie Lata \times SYS \times ND. Wartości wskaźnika IN zależały od współdziałania SYS \times ND. Natomiast wartości wskaźnika PJN oraz NA₁₄ wynikały ze współdziałania Lata \times ND (zał. 4.21a). Brak istotnej reakcji na współdziałanie czynników odnotowano tylko dla NA₆₁. Cecha ta wykazała istotną zmienność w latach a także w reakcji na dawki N. Jednakże istotną różnicę stwierdzono tylko między kontrolą N a kombinacją nawożonymi N (tab. 4.21). Wartości współczynnika zmienności (WZ) wahały się w szerokim zakresie od poniżej 35% dla czterech analizowanych cech i wskaźników (Nz, NA₆₁, IN, PJN) do 60% dla Ns (tab. 4.21).

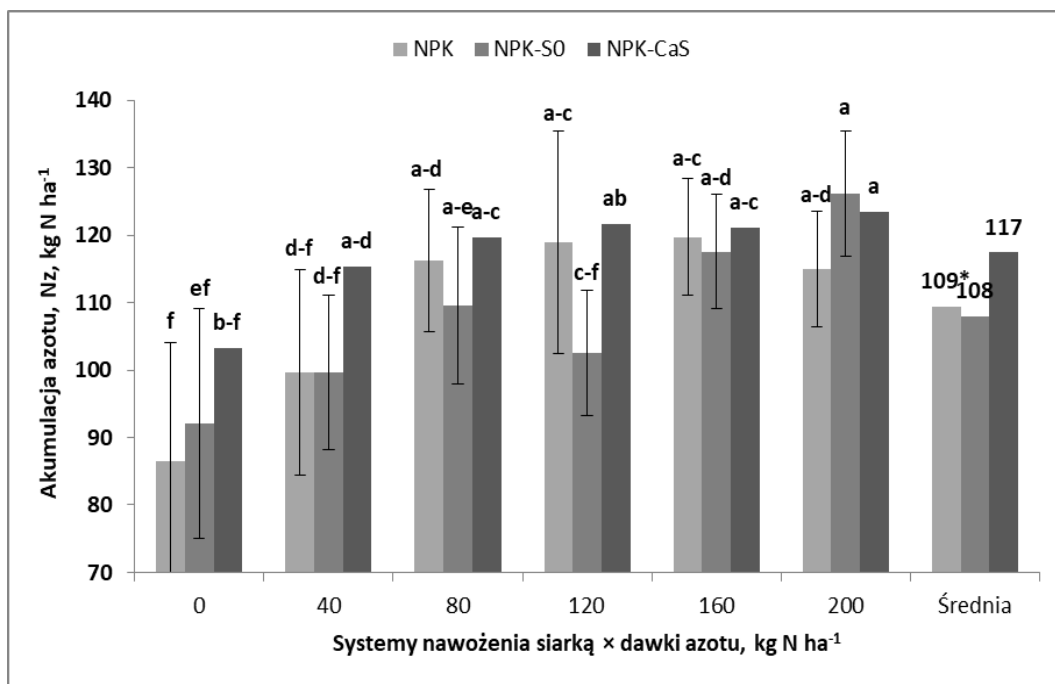
Masa azotu zakumulowana w ziarnie (NAz) była zmienna w latach, lecz to właśnie ta cecha wykazała największy związek z plonem ziarna (tab. 4.21b). Uzyskana zależność przedstawia się następująco:

$$PLZ = 0,042NAz + 2,78 \text{ dla } n = 54, R^2 = 0,66 \text{ i } p \leq 0,001$$

Otrzymane równanie jednoznacznie informuje, że zmienność plonu ziarna kukurydzy w 66% wynikała ze zmienności masy N zakumulowanego w ziarnie w stadium BBCH 89. W tym miejscu trzeba wskazać, jak wynika z analizy regresji krokowej, że cecha ta była istotnie związana z podstawowymi elementami struktury plonu, czyli liczbą ziarniaków na jednostce powierzchni (LZ) i masą 1000 ziarniaków (MTZ). Zależność tą przedstawia poniższe równanie:

$$NAz = -59,3 + 0,24MTZ + 0,04LZ \text{ dla } N = 54, R^2 = 0,64 \text{ i } p \leq 0,001$$

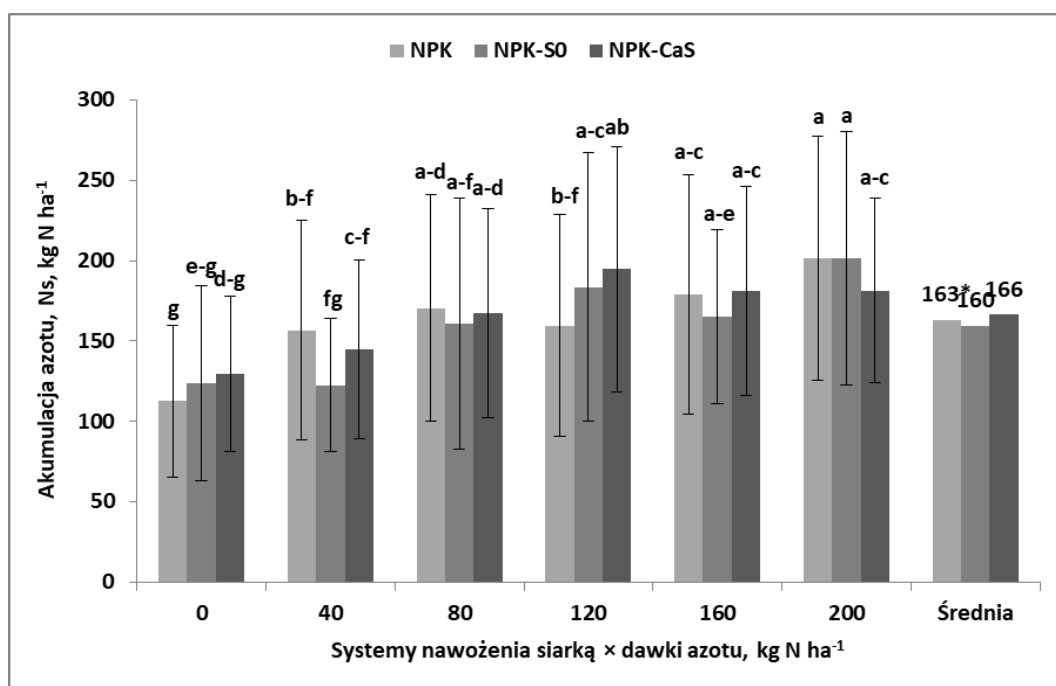
Masę N w ziarnie określało współdziałanie Lata \times SYS \times ND (zał. 4.21a). Akumulacja N w ziarnie kukurydzy istotnie zależała od SYS i ND, podlegając umiarkowanej modyfikacji w latach (WZ = 18,6%). Wartości WZ dla systemów nawożenia siarką na tle dawek N były małe i zmniejszały się z 9,1% na kontroli N do poniżej 5% na kombinacjach z największymi dawkami N (ryc. 4.48). Dla dawek N na tle systemów nawożenia siarką wartości WZ kształtowały się na poziomie 12% dla NPK i NPK-S0 oraz na poziomie 6% na NPK-CaS. Cecha ta wykazała istotny i dodatni związek korelacyjny z NA₆₁, NAs, NAc, AJN a istotny, lecz ujemny z PJN i IN (tab. 4.21b).



Ryc. 4.48. Akumulacja azotu w ziarnie kukurydzy (Nz) w reakcji na dawki azotu i systemy nawożenia siarką – doświadczenie nienawadniane, *średnia dla systemów nawożenia siarką. Źródło: opracowanie własne; *te same oznaczenia literowe oznaczają brak istotnych różnic między kolumnami; pionowy słupek w kolumnie określa wielkość standardowego błęd średniej.

Największą wartość NAz stwierdzono w 2022, która była o 33 kg N ha⁻¹ większa niż w 2020 z najmniejszą masą N w ziarnie (tab. 4.21). Ze względu na systemy nawożenia siarką, największą akumulację składnika, średnio dla lat i dawek N, stwierdzono na Obiecku NPK-CaS (tab. 4.21; ryc. 4.48). Na kontroli N, najmniejszą wartość NAz odnotowano dla NPK. Zastosowanie S⁰ zwiększyło wartość akumulację N o 5,7% (z 87 do 92 kg N ha⁻¹) a CaS o 18,7% (z 87 do 113 kg N ha⁻¹). Na obiekcie NPK akumulacja N wzrastała progresywnie do dawki 80 kg N ha⁻¹ a dla kolejnych dawek N odnotowano stabilizację. Na Obiecku NPK-S0 akumulacja N przebiegała progresywnie, lecz zmiennie w stosunku do dawek N. Największą wartość NAz otrzymano na kombinacji 200 kg N ha⁻¹. Masa N w ziarnie na obiekcie NPK-CaS wzrastała progresywnie z dawkami N, stabilizując się na mniej więcej stałym poziomie począwszy od 160 kg N ha⁻¹. Trendy reakcji NAz na dawki N były zmienne dla systemów nawożenia siarką (ryc. Z4.34). Na obiekcie NPK najlepsze dopasowanie wyników rzeczywistych do modelu regresyjnego uzyskano dla funkcji kwadratowej. Maksymalna wartość NAz wyniosła 120,9 kg N ha⁻¹ i została uzyskana dla dawki N_{opt} = 144,1 kg N ha⁻¹. Analogiczny trend odnotowano dla NPK-CaS. Kardynalne wartości otrzymanej funkcji przedstawiają się jak 123,4 kg N ha⁻¹ i 157,3 kg N ha⁻¹. Natomiast trend NAz na obiekcie NPK-S0 wykazał przebieg liniowy.

Akumulacja azotu w słomie (NAs) była zmienna w latach, wykazując reakcję na współdziałanie Lata \times SYS \times ND (zał. 4.21a). Istotnie najmniejszą wartość tej cechy odnotowano w 2020, a największą, ponad 3-krotnie (292,1 vs. 89,7 kg N ha⁻¹) stwierdzono w 2022. Różnica pomiędzy 2022 a 2021 była także bardzo duża, prawie 3-krotna. Wpływ czynników doświadczalnych na NAs przedstawiono na ryc. 4.49. Zmienność wywołana działaniem lat przedstawiają wartości standardowego błędu średniej. Średnia masa NAs dla lat i dawek N w reakcji na systemy nawożenia siarką nie wykazała istotnej różnicy, lecz nieznacznie mniejsze wartości odnotowano na NPK-S0. Na kontroli N, najmniejszą masę NAs stwierdzono na NPK, która zwiększała się w reakcji na zastosowanie siarki. Wartości WZ dla systemów nawożenia siarką na tle dawek N były małe, lecz wykazały duże wahania od 12,2% na kombinacji 40 kg N ha⁻¹ do poniżej 6% na kombinacjach z największymi dawkami N. Dla dawek N na tle systemów nawożenia siarką, wartości WZ wahały się od 18% dla NPK, poprzez 20% na NPK-S0 do 15% na NPK-CaS. Wraz we wzroście dawki N notowano wzrost NAs, lecz zmiennie dla SYS i dawek N. Otrzymany trend NAs na NPK i NPK-S0 miał przebieg liniowy (ryc. Z4.35). Natomiast dla NPK-CaS wartości omawianej cechy wzrastały zmiennie z dawkami N. Maksymalna wartość NAs wyniosła 186 kg N ha⁻¹ i została uzyskana dla N_{opt} = 156 kg N ha⁻¹.



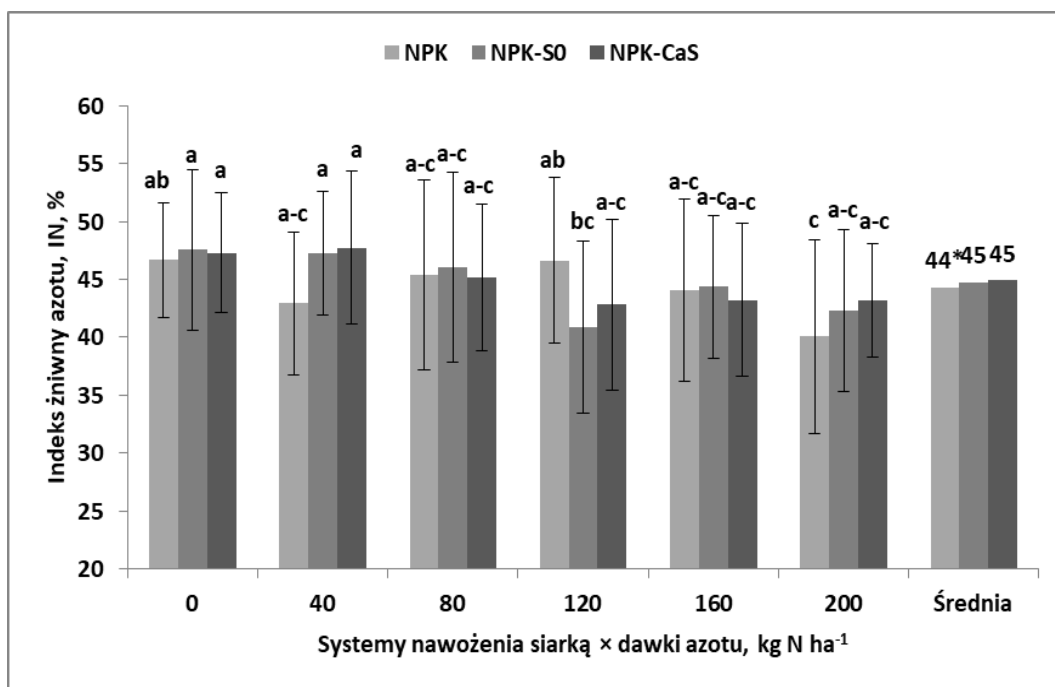
Ryc. 4.49. Akumulacja azotu w słomie kukurydzy (Ns) w reakcji na dawki azotu i systemy nawożenia siarką – doświadczenie nienawadniane, *średnia dla systemów nawożenia siarką. Źródło: opracowanie własne; ^ate same oznaczenia literowe oznaczają brak istotnych różnic między kolumnami; pionowy słupek w kolumnie określa wielkość standardowego błędu średniej.

Masa N w słomie wykazała istotną korelację z NA_{61} i NAz , wykazując przy tym bardzo silny związek z NAC i AJN . Jednocześnie NAs była ujemnie, a do tego silnie skorelowana z PJN i IN (tab. 4.21b). Szczególnie istotne okazały się związki z trzema indeksami: IN , AJN i PJN (ryc. Z4.36). Wartością krytyczną dla AJN i PJN okazała się masa $NAs = 135,9 \text{ kg N ha}^{-1}$ a dla AJN i NI $198,3 \text{ kg N ha}^{-1}$. Powyżej tych wartości następował wzrost AJN i jednocześnie progresywny spadek wartości obu wskaźników.

Akumulacja całkowita azotu (NAC) przez kukurydzę zależała od współdziałania lat z czynnikami doświadczalnymi, lecz głównym determinanem zmienności były lata. (zał. 4.21a). Największą masę NAC stwierdzono w 2022. W 2020 była ponad 2-krotnie, a w 2021 2-krotnie mniejsza (odpowiednio 100%, 44%, 51%). Systemy nawożenia siarką istotnie kształtowały NAC (ryc. Z4.37). Średnio, największą wartość omawianej cechy odnotowano dla $NPK-CaS$, a istotnie mniejszą dla $NPK-S^0$. Na obiektach NPK i $NPK-S0$, trend NAC dla wzrastających dawek N , miał charakter liniowy. Maksymalną masę N stwierdzono zatem na kombinacji 200 kg N ha^{-1} . Natomiast na $NPK-CaS$ przebieg tej zależności był zgodny z funkcją kwadratową. Wartość NAC_{maks} wyniosła 315 kg N ha^{-1} dla $N_{opt} = 169 \text{ kg N ha}^{-1}$. Omawiana cecha wykazywała istotne, dodatnie związki korelacyjne z NA_{61} , NAs , a zwłaszcza silne z Nz ($r = 0,99^{***}$) i AJN ($r = 0,96^{***}$). Tylko dla PJN i IN odnotowano wysoce istotne, lecz ujemne związki korelacyjne. Należy podkreślić istotne, dodatnie, za wyjątkiem liczby rzędów, związki korelacyjne z elementami struktury plony (zał. 4.21b).

Indeks żniwny azotu (IN), pomimo zmienności w latach, wykazał istotną zależność od współdziałania czynników doświadczalnych (zał. 4.21a). Należy jednak wskazać, że w latach 2020 i 2021 wartości IN mieściły się na poziomie 50% i wyższym, a w roku 2022 indeks ten osiągnął, średnio tylko 31,5% (tab. 4.21). Wpływ systemów nawożenia siarką na IN ujawnił się tylko na tle dawek azotu. Na kontroli azotowej odnotowano wartości najwyższe, stabilne dla wszystkich obiektów ($47 \pm 0,4\%$). Wzrost wartości IN w reakcji na zastosowanie siarki ujawniło się w postaci trendu na dwóch kombinacjach, czyli 40 i 200 kg N ha^{-1} (ryc. 4.50.). Na tej ostatniej odnotowano najmniejszą wartość IN , kształtująca się na poziomie $42 \pm 1,6\%$. Wartości WZ dla systemów nawożenia siarką na tle dawek azotu były bardzo małe, lecz niestabilne, wahając się od 1% na kombinacji 80 kg N ha^{-1} do 6,8% na kombinacji 80 kg N ha^{-1} . Zmienność IN , wynikająca z działania dawek N na tle systemów nawożenia siarką była mała, poniżej 7%. Trend IN malał wraz ze wzrostem dawki N . Linia trendu dla

wszystkich SYS przebiegała zgodnie z modelem funkcji liniowej (ryc. Z4.38). Wartości IN były ujemnie skorelowane z większością cech opisujących akumulację N przez kukurydzę oraz AJN. Indeks żniwny wykazał dodatnią korelację tylko z PJN. Jednocześnie odnotowano, za wyjątkiem liczby rzędów, ujemną korelację z wartościami elementów struktury plonu (zał. 4.21b).



Ryc. 4.50. Indeks żniwny azotu kukurydzy (IN) w reakcji na dawki azotu i systemy nawożenia siarką – doświadczenie nienawadniane. *średnia dla systemów nawożenia siarką.

Źródło: opracowanie własne; *te same oznaczenia literowe oznaczają brak istotnych różnic między kolumnami; pionowy słupek w kolumnie określa wielkość standardowego błędu średniej.

Akumulacja azotu w stadium BBCH 14 (AN_{14}) wykazała istotny ($r = 0,46^{***}$), lecz znacznie mniejszy, niż dla NAz , czy też NAC wpływ na plon ziarna (zał. 4.21b). Lata były głównym czynnikiem zmienności tej cechy. W 2020 odnotowano istotnie najmniejszą masę N w roślinach. Wartości największe, ponad 2-krotne w stosunku do 2020, odnotowano w 2021. W roku 2022 otrzymano wartości pośrednie, lecz 1,6-krotnie większe w stosunku do 2020. Systemy nawożenia siarką istotnie kształtowały akumulację N w omawianym stadium. Zastosowanie siarki, niezależnie od formy, zmniejszyło masę N w roślinie w stadium BBCH 14. Wzrost dawek azotu prowadził do wzrostu akumulacji składnika, lecz istotną różnicę stwierdzono tylko w stosunku do kontroli N. Największy przyrost masy N odnotowano pomiędzy kontrolą N, a kombinacją 40 kg N ha⁻¹. Masa N w roślinach w tym stadium rozwoju kukurydzy zależała od współdziałania lat i dawek azotu (ryc. Z4.39). Wartości WZ dla lat wahały się od 33,5% na kombinacji 200 kg N ha⁻¹ do 48% na kombinacji 40 kg N ha⁻¹.

Natomiast wpływ dawek N malał w kolejnych latach. W 2022 był 2-krotnie mniejszy niż w 2020 (8,8% vs. 16,7%). Dodatni wpływ siarki zaznaczył się istotnie na kontroli N. Rośliny w 2021 wykazały w stosunku do 2020 masę N średnio większą o 137% a w stosunku do 2020 o 17%. Trend ten utrzymał się w całym zakresie dawek. Związki korelacyjne NA_{14} z pozostałymi cechami wskaźnikami gospodarki N, za wyjątkiem NA_{61} , były nieistotne. Istotną, lecz ujemną korelację stwierdzono tylko dla NA_{61} . Jednocześnie odnotowano, za wyjątkiem obsady, dodatnie związki korelacyjne z R, zwłaszcza z LZR, LZK ($r = 0,8^{***}$) i MTZ (zał. 4.21b).

Akumulacja N w stadium BBCH 61 (NA_{61}) wykazała zmienny przebieg w latach (tab. 4.21). Największe wartości otrzymano w 2022, a istotnie mniejsze w 2021. Różnica wyniosła prawie 59 kg N ha^{-1} . Nie stwierdzono wpływu systemów nawożenia siarką na omawianą cechę, aczkolwiek zaznaczył się trend wzrostu na obiekcie NPK-CaS w stosunku kontroli NPK i NOK-S0. Wzrost dawki N prowadził do wzrostu akumulacji N w kukurydzy. Odnotowana podobną zależność jak w stadium BBCH 14, gdyż istotna różnica ujawniła się tylko między kontrolą N a kombinacjami z azotem.

Oba wskaźniki gospodarki N w kukurydzy, czyli AJN i PJN, wykazały istotny, lecz słaby, a do tego odmienny trend relacji z plonem ziarna (odpowiednio dodatni i ujemny; zał. 4.21b). O ile AJN wykazał reakcję na współdziałanie lat z czynnikami doświadczalnymi, tak PJN zależał tylko od współdziałania Lata \times ND (zał. 4.21a). Czynnikiem lat był zatem dominujący. Wartości AJN w 2022 okazały się 2-krotnie większe niż w dwóch poprzednich latach. Odwrotną prawidłowość odnotowano natomiast dla PJN (tab. 4.21). Trend AJN dla wzrastających dawek azotu był zmienny dla systemów nawożenia siarką (ryc. Z4.40). Na NPK trend ten przebiegał zgodnie z funkcją liniową. Zatem, najwyższą wartość wskaźnika otrzymano dla największej dawki N. Na obiektach z siarką trend AJN był zgodny z przebiegiem funkcji kwadratowej. Dla NPK-S0 wartość AJN_{maks} wyniosła 40 kg N t^{-1} ziarna i została uzyskana dla $N_{opt} = 161,5 \text{ kg N ha}^{-1}$. Na NPK-CaS obie wartości kardynalne dla otrzymanej funkcji kwadratowej kształtowały się, jak 38 kg N t^{-1} ziarna i 167 kg N ha^{-1} . Wskaźnik AJN_{maks} dla NPK-S0 okazał się zatem większy niż dla NPK-CaS i został uzyskany dla mniejszej dawki azotu. Omawiany wskaźnik wykazał istotne, za wyjątkiem NA_{14} , dodatnie związki korelacyjne z omawianymi cechami gospodarki N. Jednocześnie odnotowano istotne i dodatnie związki korelacyjne z OB, LZ i MTZ (zał. 4.21b).

Wskaźnik gospodarki N, jakim jest PJN nie wykazał zmienności w reakcji na systemy nawożenia siarką. W każdym roku badań, wraz ze wzrostem dawki N wartość

PJN była mniejsza (ryc. Z4.41). Wartości WZ dla lat na tle dawek azotu były ekstremalnie wysokie (od 285% do 327%). Natomiast dla dawek N na tle lat były niskie, poniżej 10% w 2021 i 2022 i 10,5% w 2020. Wskaźnik PJN był istotnie, za wyjątkiem NA₁₄, skorelowany z badanymi cechami gospodarki N i AJN. Dodatnią korelację stwierdzono tylko dla IN ($r = 0,94^{***}$). Jednocześnie wskaźnik ten był istotnie, lecz ujemnie skorelowany z OB, LZ i MTZ (zał. 4.21b).

Tabela 4.21. Akumulacja azotu w okresie wegetacji kukurydzy i wskaźniki akumulacji – doświadczenie nienawadniane.

Czynnik	Poziom Czynnika	NA ₁₄	NA ₆₁	Nz kg N ha ⁻¹	Ns	NAc	AJN kg N t ⁻¹	PJN kg ziarna kg ⁻¹ N	IN %
Lata (L)	2020	8,3 ^c	155,2 ^b	97,8 ^c	89,7 ^c	187,5 ^c	28,0 ^b	36,2 ^a	52,4 ^a
	2021	18,8 ^a	117,6 ^c	106,1 ^b	107,5 ^b	213,6 ^b	27,5 ^a	37,3 ^a	50,0 ^b
	2022	13,3 ^b	176,5 ^a	130,8 ^a	292,1 ^a	422,9 ^a	53,8 ^a	19,0 ^b	31,5 ^c
	F _{ob, p}	307***	76,3***	120***	1031***	1083***	889***	665***	469***
Systemy nawożenia siarką (SYS)	NPK	14,6 ^a	145,4	109,4 ^b	163,3	272,7 ^{ab}	36,2	31,5	44,3
	NPK-S ⁰	13,1 ^b	147,5	107,9 ^b	159,6	267,6 ^b	36,9	30,3	44,7
	NPK-CaSO ₄	12,7 ^b	156,3	117,4 ^a	166,3	283,7 ^a	36,2	30,7	44,9
	F _{ob, p}	11,3***	2,8 ^{ns}	10,6***	0,9 ^{ns}	4,4 [*]	0,8 ^{ns}	2,4 ^{ns}	0,4 ^{ns}
Dawki azotu (ND) kg N ha ⁻¹	0	10,6 ^b	118,2 ^b	94,0 ^c	122,0	216,0 ^d	31,8 ^c	35,5 ^a	47,2 ^a
	40	13,6 ^a	146,0 ^a	104,9 ^b	141,4	246,2 ^c	33,8 ^c	32,4 ^b	46,0 ^{ab}
	80	14,2 ^a	154,8 ^a	115,1 ^a	166,3	281,4 ^b	36,8 ^b	31,0 ^{bc}	45,5 ^{ab}
	120	13,7 ^a	157,3 ^a	114,4 ^a	179,2	293,6 ^b	38,0 ^{ab}	29,7 ^{cd}	43,4 ^{bc}
	160	13,8 ^a	161,2 ^a	119,5 ^a	175,2	294,7 ^{ab}	38,3 ^{ab}	28,8 ^{cd}	43,9 ^{bc}
	200	14,9 ^a	161,0 ^a	121,5 ^a	194,4	316,0 ^a	39,9 ^a	27,6 ^d	41,9 ^c
	F _{ob, p}	11,9***	11,6***	21,9***	29,3***	44,1***	18,4***	25,0***	6,6***
	Średnia	13,5	149,8	111,6	163,1	274,6	36,4	30,8	44,6
	OSD	4,9	32,6	20,8	98,0	114,3	13,1	9,1	10,0
	WZ, %	36,7	21,8	18,6	60,1	41,6	35,9	29,6	22,3

Źródło: opracowanie własne; ***, **, * - istotność na poziomie 0,001; 0,01; 0,05; ns – brak istotnego działania czynnika; ; OSD – odchylenie standardowe, WZ – współczynnik zmienności^a – ta sama litera w rzędzie oznacza brak istotnego zróżnicowania cechy w kolumnie dla danego czynnika; NA – zakumulowany azot; 14, 61 – fazy rozwoju kukurydzy w skali BBCH; z, s, c – ziarno, słoma, akumulacja całkowita; AJN - akumulacja jednostkowa azotu; PJN – produktywność jednostkowa azotu; IN – indeks żniwny azotu.

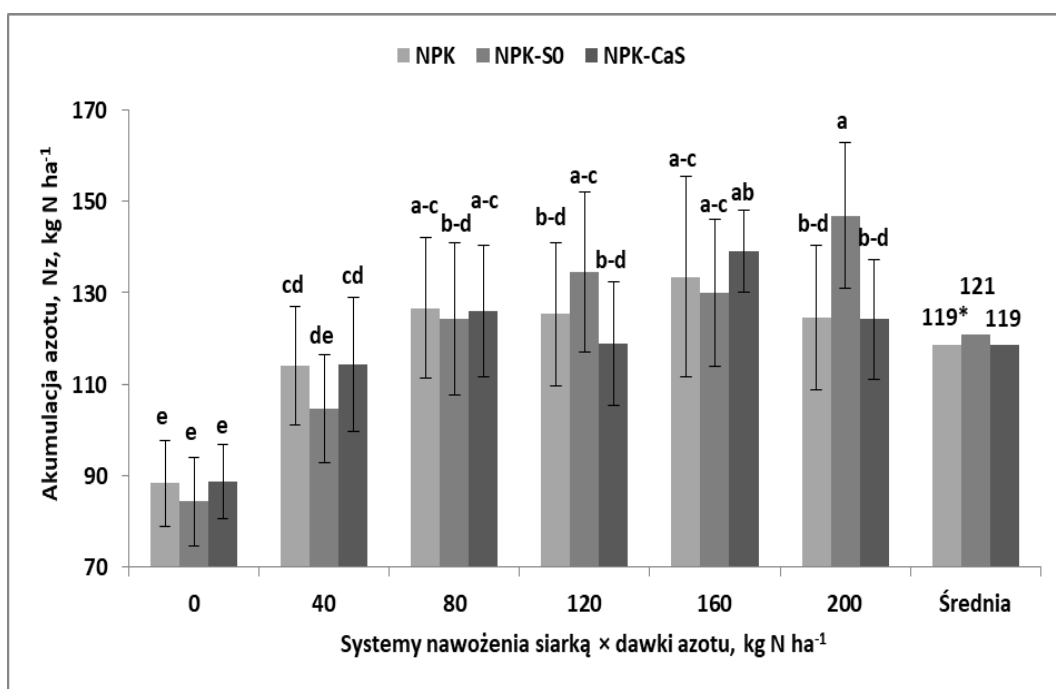
4.11b. Doświadczenie nawadniane

Spośród ośmiu analizowanych cech i wskaźników akumulacji N przez kukurydzę w sezonie wegetacyjnym, siedem wykazało zależność od współdziałania Lata \times SYS \times ND. Tylko NA₆₁ zależał od współdziałania Lata \times ND (zał. 4.22a). Współczynnik zmienności (WZ) dla badanych cech i wskaźników gospodarki N w kukurydzy wykazał małe wahania. Małą zmienność (< 15%) odnotowano dla IN, AJN i PJN). W średniej klasie zmienności (15-35%) mieściły się NAz, NAc i NAs). Dużą zmienność (>35%) odnotowano natomiast dla NA₁₄ i NA₆₁ (tab. 4.22).

Masa azotu w ziarnie (NAz) wykazała istotny, największy związek korelacyjny z plonem ziarna spośród analizowanych cech (zał. 4.22b). Otrzymane równanie przedstawia się następująco:

$$PLZ = 0,054NAz + 3,053 \text{ dla } n = 54, R^2 = 0,76, p \leq 0,001$$

Uzyskane równanie informuje, że zmienność masy N w ziarnie w 76% określała zmienność plonu ziarna. Cecha ta podlegała głównie zmienności w latach (tab. 4.22).

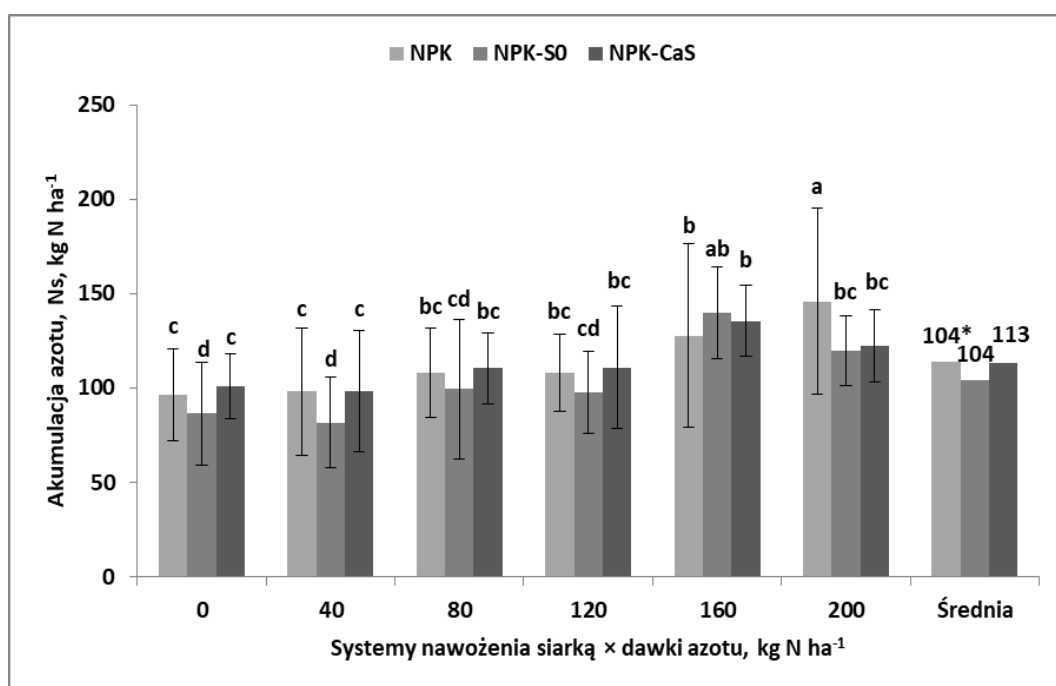


Ryc. 4.51. Akumulacja azotu w ziarnie kukurydzy (Nz) w reakcji na dawki azotu i systemy nawożenia siarką – doświadczenie nawadniane, *średnia dla systemów nawożenia siarką. Źródło: opracowanie własne; *te same oznaczenia literowe oznaczają brak istotnych różnic między kolumnami; pionowy słupek w kolumnie określa wielkość standardowego błędu średniej.

Największa wartość tej cechy otrzymana w 2022 była o 45,5 kg N ha⁻¹ większa niż w 2021, w którym była istotnie najmniejsza. Średnie wartości NAz dla systemów nawożenia siarką nie wykazały różnic, mieszcząc się na poziomie 120 kg N ha⁻¹ (ryc.

4.51). WZ dla systemów nawożenia siarką na tle dawek N był niski (od 1% do 9,8%), wykazując tendencję wzrostu ze wzrostem dawek N. Znaczne większe wahania odnotowano dla dawek N na tle systemów nawożenia siarką. Zdecydowanie większą wartość WZ odnotowano dla NPK-S0 (18,7%) a poniżej 15% dla pozostałych obiektów z siarką. Wartości NAz wykazały poza ziarnem istotną i dodatnią korelację z NAc, NA₆₁, Ns, AJN a ujemną z PJN. Jednocześnie odnotowano dodatnią korelację z OB, LZ i MTZ (zał. 4.22b).

Trendy NAz dla wzrastających dawek N były odmienne dla obiektów z siarką (ryc. Z4.42). Linia trendu na obiekcie NPK-S0 wykazała przebieg zgodny z funkcją liniową. Największą wartość NAz odnotowano zatem dla największej dawki N. Na pozostałych obiektach, trend omawianej cechy, najlepiej opisuje funkcja kwadratowa. Na NPK, maksymalna wartość akumulacji N, czyli NAz_{maks} osiągnęła 135,4 kg⁻¹ kg N ha⁻¹ i została uzyskana dla N_{opt} = 150 kg N ha⁻¹. Dla NPK-CaS obie wartości kardynalne kształtowały się jak 129 kg⁻¹ kg N ha⁻¹ i 137 kg N ha⁻¹.



Ryc. 4.52. Akumulacja azotu w słomie kukurydzy (Ns) w reakcji na dawki azotu i systemy nawożenia siarką – doświadczenie nawadniane, *średnia dla systemów nawożenia siarką. Źródło: opracowanie własne; *te same oznaczenia literowe oznaczają brak istotnych różnic między kolumnami; pionowy słupek w kolumnie określa wielkość standardowego błędu średniej.

Akumulacja N w słomie (NAs) była zmienna w latach. Najmniejszą wartość stwierdzono w 2020 a największą w 2022. Różnica wyniosła aż 51 kg N ha⁻¹ (tab. 4.22). Istotne różnice w działaniu dawek N zaznaczyły się już na kontroli N, na której odnotowano mniejsze wartości na obiekcie NPK-S0 (ryc. 4.52). Trend ten utrzymywał

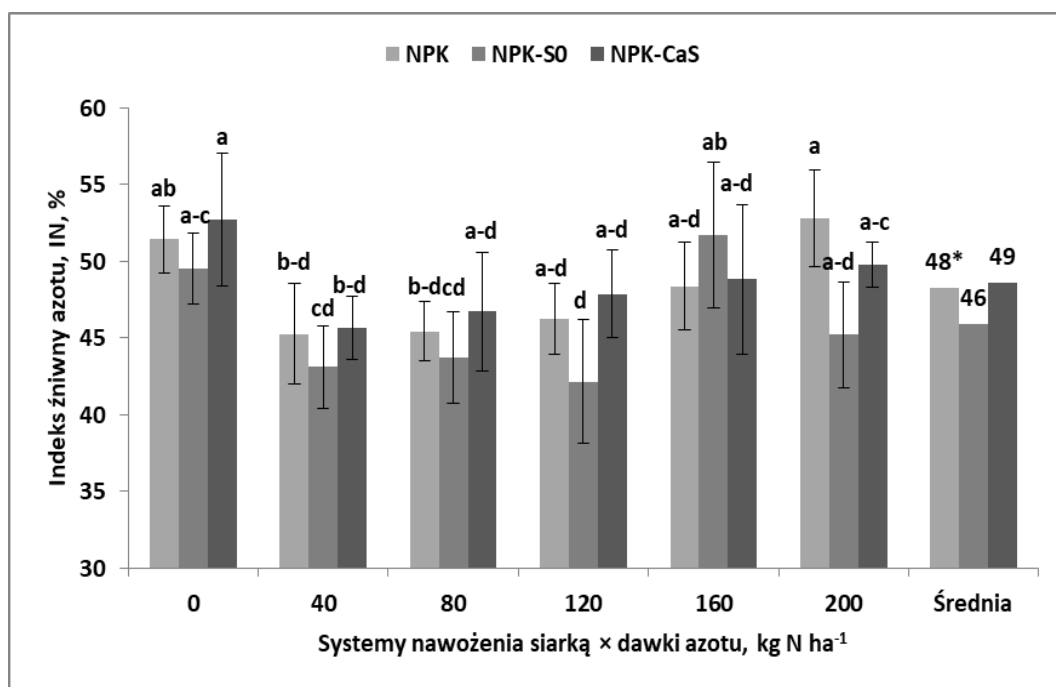
się aż do kombinacji 160 kg N ha⁻¹, na której ujawniła się dominacja obiektów z siarką. Całkowicie odwrotną prawidłowość stwierdzono na kombinacji 200 kg N ha⁻¹. Wartości WZ dla systemów nawożenia siarką były małe i podlegały pewnym wahaniom dla poszczególnych dawek azotu (4,6% dla kombinacji 160 kg N ha⁻¹ do 11% na kombinacji 200 kg N ha⁻¹). Natomiast wahania tego wskaźnika dla dawek N okazały się największe dla NPK-S0, wynosząc 21%. Na pozostałych obiektach były znacznie mniejsze, zwłaszcza na NPK-CaS (12,3%).

Generalnie, wzrost dawek N, niezależnie od wahań wartości NAs, prowadził do wzrostu akumulacji N w słomie. Linię trendu dla wszystkich systemów nawożenia siarką najlepiej opisuje funkcja liniowa (ryc. Z4.43). Dynamika wzrostu NAs w reakcji na dawki N, jak wynika z wartości współczynnika kierunkowego równań, była taka sama dla NPK i NPK-S0. Na obiekcie NPK-CaS dynamika wzrostu była mniejsza, lecz wynika to z większej wartości stałej, to znaczy wartości NAs na kontroli N. Masa N w słomie wykazała istotną, dodatnią korelację z NA₁₄, NA₆₁, NAz, a także oddziaływała istotnie i dodatnio z NAc, IN i AJN, a ujemnie z PJN. Jednocześnie odnotowano istotną i dodatnią korelację z OB, MTZ i LZ (zał. 4.22b).

Akumulacja całkowita N przez kukurydzę w stadium BBCH 89 (NAc) była dodatnio i silnie skorelowana z plonem ziarna ($r = 0,84^{***}$, zał. 4.22b). Głównym czynnikiem zmienności były lata (tab. 4.22). Najmniejszą NAc odnotowano w 2021, a największą w 2022, a różnica wyniosła 83 kg N ha⁻¹. Nie odnotowano znaczącego wpływu systemów nawożenia siarką, aczkolwiek średnie wartości na NPK-S0 były mniejsze, niż na pozostałych obiektach. Prawidłowość ta utrzymywała się aż do kombinacji 80 kg N ha⁻¹ (ryc. Z4.44). Wartości NAc wzrastały wraz z dawkami N. Wyraźny trend wzrostowy zaznaczał się do kombinacji 160 kg N ha⁻¹, na której istotnie większą akumulację N odnotowano na obiektach z siarką. Na kombinacji 200 kg N ha⁻¹ prawidłowość ta była całkowicie odwrotna.

Trend NAc na obiektach NPK i NPK-S0 wykazał przebieg zgodny z funkcją liniową, a na NPK-CaS z kwadratową (ryc. Z4.45). Na tym obiekcie wartość NAc_{maks} wyniosła 254,6 kg N ha⁻¹ dla N_{opt} = 187,8 kg N ha⁻¹. Wartości NAc zależały istotnie od NAs i NAz. Odnotowano także istotny i dodatni związek omawianej cechy z NA₁₄ i NA₆₁. Ponadto cecha ta była dodatnio skorelowana z AJN i ujemnie z PJN, lecz jednocześnie nie odnotowano istotnego związku z IN. Trzy elementy struktury plonu, to znaczy MTZ, LZ i OB, wykazały istotny i dodatni związek korelacyjny z NAc (zał. 4.22b).

Indeks żniwny azotu (IN) nie wykazał istotnego związku korelacyjnego z plonem ziarna ($r = -0,07$, zał. 4.22b). Wartości indeksu były zmienne w latach i w reakcji na czynniki doświadczalne. Cecha ta wykazała jednakże najmniejszą wartość WZ (11,8%). W pierwszym roku badań wskaźnik IN osiągnął wartość mniejszą, niż w kolejnych latach badań, w których notowano wartości istotnie większe, lecz zbliżone do siebie (tab. 4.22). Wskaźnik IN, uśredniony dla lat i dawek N, był najmniejszy na NPK-S⁰, a istotnie większy na pozostałych obiektach (ryc. 4.53). Wartości WZ dla systemów nawożenia siarką dla dawek azotu były ekstremalnie małe (< 10%), a największe wahania dla dawek N, lecz też małe, odnotowano na NPK-S0 (8,3%). Na kontroli N na obiektach NPK i NPK-CaS wartości IN przekroczyły 50%. Na kombinacjach od 40 do 120 kg N ha⁻¹ odnotowano depresję wartości wskaźnika, która ponownie, lecz zmiennie dla obiektów, uległa zwiększeniu na kombinacjach 160 i 200 kg N ha⁻¹. IN wykazał dodatnią korelację z NA₁₄, Ns i AJN a ujemną z PJN. Nie odnotowano istotnych związków korelacyjnych z plonem ziarna i akumulacją N w ziarnie (zał. 4.22b).



Ryc. 4.53. Indeks żniwny azotu w kukurydzy (IN) w reakcji na dawki azotu i systemy nawożenia siarką – doświadczenie nawadniane.

Źródło: opracowanie własne; *te same oznaczenia literowe oznaczają brak istotnych różnic między kolumnami; pionowy słupek w kolumnie określa wielkość standardowego błędu średniej; *średnia dla systemów nawożenia siarką.

Akumulacja azotu w stadium BBCH 14 (NA₁₄) wykazała istotną i dodatnią korelację z plonem ziarna ($r = 0,56^{***}$), lecz siła predykcji plonu, wyrażona wartością współczynnika determinacji (R^2), wyniosła zaledwie 31% (zał. 4.22b). Głównym

determinantem zmian NA_{14} były lata (tab. 4.22). Cecha ta osiągnęła najmniejszą wartość w 2020, a w 2022 była ponad 2-krotnie większa. Współczynnik zmienności dla lat na tle dawek azotu wahał się od 37,4% (kontrola N) do 48,2% na kombinacji 80 kg N ha⁻¹ (ryc. Z4.46). Zmienność NA_{14} , wynikająca z działania dawek N była dużo mniejsza. Jednakże na obiekcie NPK-S0 okazała się 2-krotnie większa niż na pozostałych obiektach (20,5% względem 9% na NPK i 10% względem NPK-CaS). Istotne, dodatnie oddziaływanie NA_{14} na pozostałe cechy i wskaźniki gospodarki N odnotowano dla NA_{61} (słabe) NAs, NAc (duże) i IN (średnie). Spośród elementów struktury plonu istotnie i dodatnie związki korelacyjne odnotowano dla LZR, LZ i MTZ (zał. 4.22b).

Akumulacja N przez kukurydzę w stadium BBCH 61 (AN_{61}) wykazała istotną reakcję na współdziałanie lat i dawek azotu (tab. 4.22a). Związek korelacyjny tej cechy z plonem ziarna był istotny, lecz wartość predykcyjna okazała się mała, lecz wyższa niż dla NA_{14} ($R^2 = 0,44$ vs. 0,31) (zał. 4.22b). Najmniejszą masę N w tym stadium kukurydzy odnotowano w 2021, a największą, ponad 2-krotnie w 2022 (tab. 4.22). Wpływ dawek azotu na wartość tej cechy w latach badań był zmienny i ujawnił się zasadniczo tylko w 2022. Tylko w tym roku wartość omawianej cechy wzrastała aż do 120 kg N ha⁻¹, a dla kolejnych dawek N uległa zmniejszeniu (ryc. Z4.47). Wartości AN_{61} wykazały istotny, dodatni wpływ na dwie cechy, a mianowicie NAz ($r = 0,81^{***}$) i NAc ($r = 0,76^{***}$), a także na NAs, AJN a ujemny na PJN. Spośród elementów struktury plonu największy, dodatni związek korelacyjny stwierdzono dla OB, MTZ i LZ, a ujemny dla LZR i LZK (zał. 4.22b).

Wskaźniki gospodarki N, czyli AJN i PJN nie wykazały istotnego związku z plonem ziarna (zał. 4.22b). Oba wskaźniki istotnie reagowały na współdziałanie lat z czynnikami doświadczalnymi (zał. 4.22a). Istotnie większe wartości AJN notowano w 2022 w porównaniu do dwóch pierwszych lat badań (tab. 4.22). Wpływ systemów nawożenia siarką, uśredniony dla Lat i dawek N, był nieistotny (tab. 4.22). Wartości wskaźnika wykazały złożony trend w reakcji na dawki N (ryc. Z4.48). Największe wartości ANJ notowano, niezależnie od systemu nawożenia siarką, na kombinacjach nawożonych największymi dawki N, a następnie na kontroli N. Na kombinacjach nawożonych od 40 do 120 kg N ha⁻¹ wystąpiła depresja wartości wskaźnika, zwłaszcza głęboka na obiekcie z NPK-S0. Za wyjątkiem kombinacji 160 kg N ha⁻¹, mniejsze wartości wskaźnika występowały na obiekcie NPK-S0. Wartości współczynnika zmienności (WZ) dla systemów nawożenia siarką dla dawek N były bardzo małe 3,9-

7,6%). Zmienność działania dawek N dla systemów nawożenia siarką była większa, lecz nie przekroczyła 12% na obiekcie NPK-S0. Wskaźnik AJN wykazał istotny, silny i dodatni związek korelacyjny z NAs, NAc i IN, a dużo mniejszy z Na₆₁, Nz. Istotną korelację AJN z elementami struktury plonu odnotowano dla OB (dodatnia) i LZR i LZK (ujemna). Odwrotne zależności odnotowano dla PJN (zał. 4.22b).

Wartości wskaźnika PJN były istotnie większe w 2021 w porównaniu do pozostałych lat badań (tab. 4.22). Średnie wartości tej cechy dla systemów nawożenia siarką różniły się w niewielkim stopniu ($42,1 \pm 2,4$ kg ziarna kg^{-1} N) (ryc. Z4.49). Wartości współczynnika zmienności dla systemów nawożenia siarką był małe (<10%), a największą odnotowano na kombinacji 40 kg N ha^{-1} . Dla tej kombinacji odnotowano też największe wartości wskaźnika PJN i to niezależnie od systemu nawożenia siarką. Dopiero od tej kombinacji, niezależnie od systemów nawożenia siarką, następował liniowy spadek wartości PJN, a największy okazał się na NPK-S0. Omawiany wskaźnik był ujemnie skorelowany z analizowanymi cechami wskaźnikami gospodarki N. Odnotowano dodatni, istotny, lecz słaby związek z LZR i LZK (tab. 4.22b).

Istotnym składnikiem, kształtującym wartości wskaźników gospodarki azotem w kukurydzy, okazała się masa N w słomie (zał. 4.22b). Wartości IN i AJN wzrastały liniowo ze wzrostem NAs (ryc. Z4.50). Pomimo że, zależność między AJN i IN była istotna, to siła tej zależności była mała ($R^2 = 0,24$). Jednocześnie oba te wskaźniki były ujemnie skorelowane z PJN (zał. 4.22b). Wzrost NAs powyżej 87 kg N ha^{-1} prowadził do wzrostu IN i jednoczesnego spadku PJN. Równowaga między AJN a PJN nastąpiła dopiero dla NS, wynoszącego 204,7 kg N ha^{-1} .

Tabela 4.22. Akumulacja azotu w okresie wegetacji kukurydzy i wskaźniki akumulacji – doświadczenie nawadniane.

Czynnik	Poziom Czynnika	NA ₁₄	NA ₆₁	Nz kg N ha ⁻¹	Ns	NAc	AJN kg N t ⁻¹	PJN kg ziarna kg ⁻¹ N	IN %
Lata (L)	2020	4,3 ^c	175,6 ^b	120,0 ^b	88,9 ^c	208,9 ^b	24,8 ^a	41,1 ^b	42,6 ^b
	2021	8,8 ^b	106,9 ^c	96,3 ^c	102,4 ^b	198,7 ^b	22,7 ^a	45,4 ^a	50,7 ^a
	2022	10,6 ^a	240,8 ^a	141,8 ^a	139,9 ^a	281,7 ^a	25,6 ^b	39,7 ^b	49,4 ^a
	F _{ob, p}	205 ^{***}	379 ^{***}	168 ^{***}	112 ^{***}	172 ^{***}	26,3 ^{***}	31,2 ^{***}	58,0 ^{***}
Systemy nawożenia siarką (SYS)	NPK	8,3 ^a	169,0	118,7	114,0	232,7	24,7 ^a	41,7 ^b	48,3 ^a
	NPK-S ⁰	7,9 ^{ab}	174,3	120,8	104,1	224,9	23,3 ^b	44,0 ^a	45,9 ^b
	NPK-CaSO ₄	7,5 ^b	180,0	118,6	113,1	231,6	25,1 ^a	40,6 ^b	48,6 ^a
	F _{ob, p}	3,3 [*]	2,6 ^{ns}	0,5 ^{ns}	4,8 ^{**}	1,5 ^{ns}	9,8 ^{***}	10,9 ^{***}	6,6 ^{**}
Dawki azotu (ND) kg N ha ⁻¹	0	6,4 ^c	137,1 ^d	87,1 ^c	94,6 ^b	181,7 ^d	24,1 ^b	42,8 ^b	51,2 ^a
	40	7,8 ^{ab}	158,5 ^c	111,0 ^b	92,8 ^b	203,8 ^c	21,7 ^c	47,4 ^a	44,7 ^b
	80	8,3 ^{ab}	171,0 ^{bc}	125,7 ^a	105,9 ^{ab}	231,6 ^b	23,1 ^{bc}	43,9 ^b	45,3 ^b
	120	7,6 ^{bc}	195,2 ^a	126,2 ^a	105,5 ^{ab}	231,7 ^b	23,7 ^b	42,7 ^b	45,4 ^b
	160	8,2 ^{ab}	187,3 ^{ab}	134,2 ^a	134,3 ^a	268,5 ^a	26,6 ^a	38,1 ^c	49,6 ^a
	200	9,0 ^a	197,7 ^a	131,9 ^a	129,3 ^a	261,2 ^a	27,1 ^a	37,6 ^c	49,3 ^a
	F _{ob, p}	7,2 ^{***}	23,6 ^{***}	50,9 ^{***}	24,7 ^{***}	46,1 ^{***}	25,2 ^{***}	11,6 ^{***}	30,1 ^{***}
	Średnia	7,9	174,5	119,4	110,4	229,8	24,4	42,1	47,6
	OSD	3,1	63,7	26,8	31,2	51,9	3,1	5,6	5,6
	WZ,%	39,7	36,5	22,5	28,3	22,6	12,8	13,4	11,8

Źródło: opracowanie własne; ***, **, * - istotność na poziomie 0,001; 0,01; 0,05; ns – brak istotnego działania czynnika; ; OSD – odchylenie standardowe, WZ – współczynnik zmienności^a – ta sama litera w rzędzie oznacza brak istotnego zróżnicowania cechy w kolumnie dla danego czynnika; NA – zakumulowany azot; 14, 61 – fazy rozwoju kukurydzy w skali BBCH; z, s, c – ziarno, słoma, akumulacja całkowita; AJN - akumulacja jednostkowa azotu; PJN – produktywność jednostkowa azotu; IN – indeks żniwny azotu.

4.12. Wskaźniki gospodarki kukurydzy azotem

4.12a. Doświadczenie nienawadniane

4.12a.1. Przed kwitnieniem, BBCH 14 – BBCH 61

Spośród sześciu badanych wskaźników gospodarki N w kukurydzy, które dotyczyły okresu przed kwitnieniem, aż pięć wykazało zależność od współdziałania Lata \times SYS \times ND. Tylko jeden, a mianowicie, N_{in61} , zależał od współdziałania Lata \times ND (zał. 4.23a.). Współczynnik zmienności (WZ) dla omawianych wskaźników był największy dla N_{b61} ($>$ wielokrotnie powyżej 35%). W zakresie zmienności średniej (15-35%) mieściły się N_{in14} , N_{g61} , N_{in61} i EN_{in14} . zmienność małą ($<$ 15%) odnotowano tylko dla EN (tab. 4.23).

Plon ziarna wykazał dodatnią korelację z trzema z analizowanych wskaźników gospodarki N kukurydzy w okresie przed kwitnieniem. Dla obu wskaźników efektywności, czyli EN_{in14} i EN_{in61} , odnotowano zależności ujemne. Natomiast N_{g61} nie wykazał istotnej korelacji z PLZ (zał. 4.23b). Zależność plonu od N_{in61} i EN_{in61} przedstawiają poniższe równania:

1. N_{in61} :

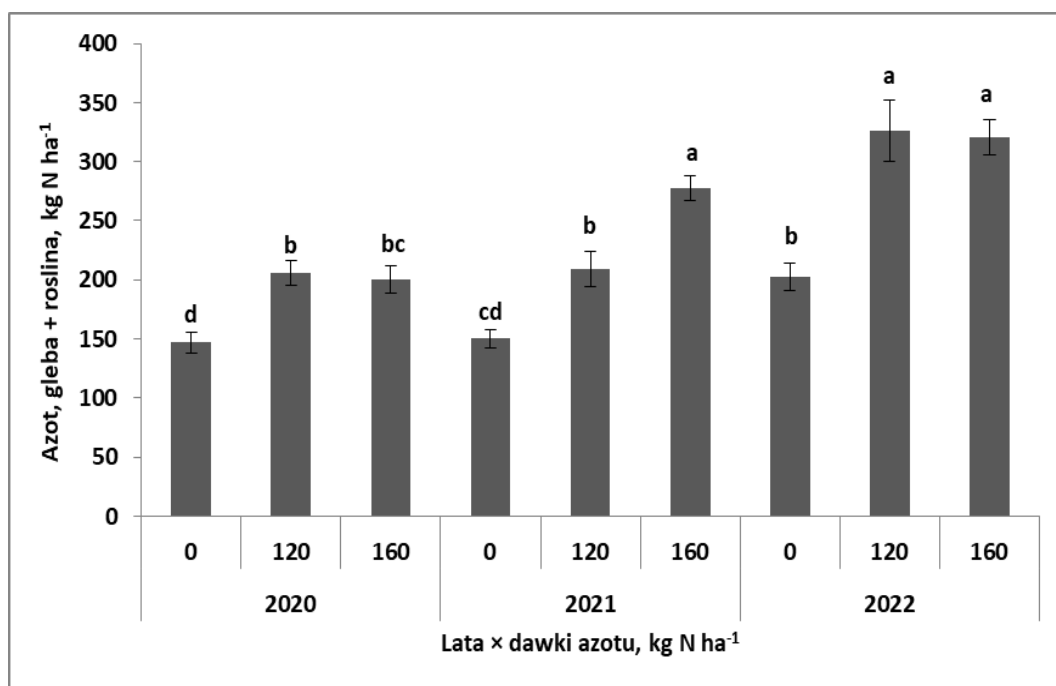
$$PLZ = 0,01N_{in61} + 5,1 \text{ dla } n = 27, R^2 = 0,33 \text{ i } p \leq 0,01$$

2. EN_{in61} :

$$PLZ = 0,002EN_{in61}^2 - 0,3EN_{in61} + 19,1 \text{ dla } n = 27, R^2 = 0,47 \text{ i } p \leq 0,05$$

Wskaźnik N_{in61} okazał się najlepszym, ilościowo wskaźnikiem plonu ziarna. Pomimo istotnego wpływu na plon, wartość diagnostyczna wskaźnika była mała, gdyż tylko w 33% tłumaczy zmienność plonu ziarna. Wskaźnik ten był istotnie zmienny w latach (tab. 4.23). Mniejsze wartości wskaźnika stwierdzono w 2020 i 2021, a największą w ostatnim roku badań. Masa azotu w systemie gleba- roślina przed kwitnieniem wykazała zmienność Lata \times ND (ryc. 4.54). Wartości N_{in61} na kontroli N w dwóch pierwszych latach kształtowały się na zbliżonym poziomie, a istotny wzrost nastąpił dopiero w 2022. W 2020 odnotowano istotny wzrost wartości wskaźnika pod wpływem nawożenia N, niezależnie od dawki, lecz tylko w stosunku do kontroli N. Podobną zależność odnotowano w 2022, a przyrost masy N w stosunku do kontroli N był zdecydowanie większy. Tylko w 2021 odnotowano wyraźny trend wzrostu N_{in61} wraz ze wzrostem dawki N. Jednakże maksymalna wartość N_{in61} na kombinacji 160 kg N ha⁻¹ nie przekroczyła maksymalnych wartości odnotowanych w 2022. Wartości N_{in61} istotnie

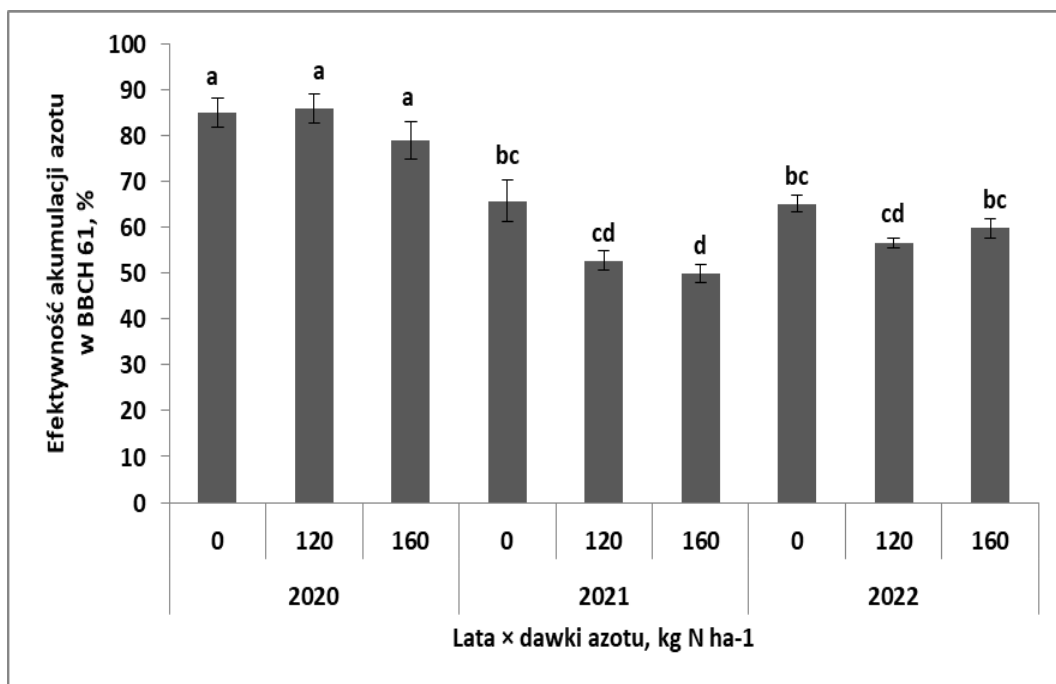
i silnie zależały od N_{in14} i w istotnie mniejszym stopniu od N_{g61} ($r \rightarrow 0,71^{***}$ vs. $0,44^*$; tab. 4.23b). Jednocześnie odnotowano ujemny związek ze wskaźnikami efektywności, istotny dla EN_{in61} . Omawiany wskaźnik wykazał dodatni i istotny związek z elementami struktury plonu, takimi jak LZ a zwłaszcza MTZ.



Ryc. 4.54. Masa azotu w systemie gleba-roślina przed kwitnieniem (N_{in61} , BBCH 61) w latach na tle dawek azotu – doświadczenie nienawadniane.

Źródło: opracowanie własne; *te same oznaczenia literowe oznaczają brak istotnych różnic między kolumnami; pionowy słupek w kolumnie określa wielkość standardowego błędu średniej.

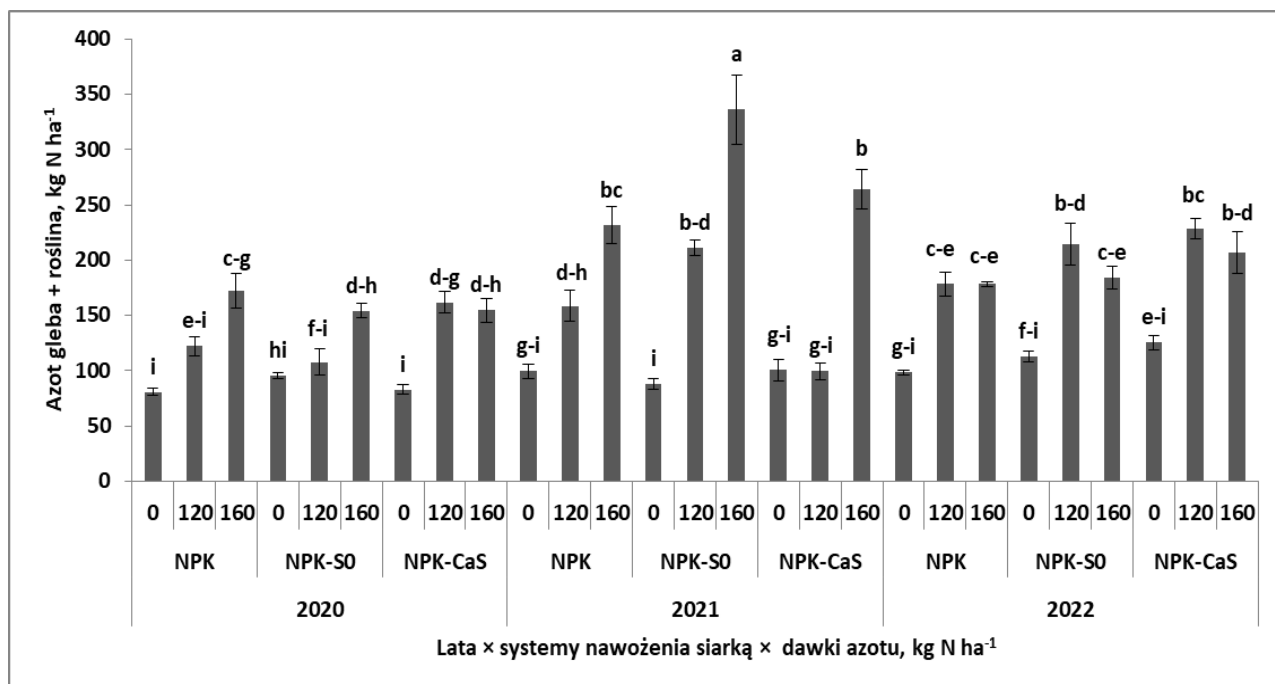
Z drugiego z powyższych równań jednoznacznie wynika, że wzrost efektywności N wprowadzonego do systemu gleba/rośliny w stadium BBCH 61, czyli N_{in61} , kukurydzy prowadził do spadku plonu ziarna. Minimalny plon, wynoszący $6,675 \text{ t ha}^{-1}$ otrzymano dla $EN_{in61opt} = 83,1\%$. Taki poziom efektywności N_{in61} odnotowano w 2020, a więc w sezonie z najmniejszymi plonami. Wzrost efektywności N w układzie gleba/roślina prowadził do wzrostu plonu ziarna, co odnotowano w 2021 i i 2022. Pomimo, że cecha ta zależała od współdziałania $Lata \times SYS \times ND$, to istotnie rzeczy, głównym determinantem zmienności były lata (ryc. 4.55). W 2020 nie odnotowano wartości EN_{in61} były najwyższe, lecz nie odnotowano reakcji na dawki N. W pozostałych dwóch sezonach wartości wskaźnika były największe na kontroli N. Zastosowanie N prowadziło do spadku wartości wskaźnika, udowodnione w 2021. Wskaźnik ten był ujemnie skorelowany z elementami struktury plonu, zwłaszcza z LZR, LZK ($r = -0,83^{***}$), jak i MTZ ($-0,71^{***}$).



Ryc. 4.55. Efektywność akumulacji azotu przez kukurydzę na początku kwitnienia (EN_{in61} , BBCH 61) w latach na tle dawek azotu – doświadczenie nienawadniane.

Źródło: opracowanie własne; ^ate same oznaczenia literowe oznaczają brak istotnych różnic między kolumnami; pionowy słupek w kolumnie określa wielkość standardowego błędu średniej.

Nieco mniejszą, lecz istotną wartość diagnostyczną dla predykcji PLZ odnotowano dla N_{in14} . Jednakże to właśnie ta cecha wykazała, za wyjątkiem liczby rzędów (R), dodatnią, lecz na przeciętnym poziomie, korelację z elementami struktury plonu (zał. 4.23b). Masa azotu w systemie gleba - roślina w stadium BBCH 14 była istotnie zmienna pod wpływem czynników doświadczalnych, lecz głównym determinantem zmian były lata (tab. 4.23). Najmniejszą masę N_{in14} stwierdzono w 2020. W sezonach 2021 i 2022 wartość tej cechy była zbliżona, lecz istotnie większa od notowanej w 2020 (tab. 4.23 i ryc. 4.56). Tylko w 2021, zastosowanie siarki wyraźnie zwiększyło masę N_{in14} . Istotnie większy wzrost o prawie 14% odnotowano na NPK-S0, a nieco mniejszą na NPK-CaS (+7,9%). Nawożenie N prowadziło do wzrostu wartości wskaźnika. Istotny wzrost w reakcji na dawki N ujawnił się sporadycznie na NPK w 2020, a na NPK i NPK-S0 w 2021. W tych dwóch wariantach doświadczalnych wzrost masy był zgodny z wielkością zastosowanych dawek N. W pozostałych wariantach ujawniał się tylko wzrost na kombinacji 160 kg N ha⁻¹ (2020 → NPK-S0, 2021 → NPK-CaS).



Ryc. 4.56. Masa azotu w systemie gleba-roślina w stadium BBCH 14 (N_{in14}) w latach w reakcji na systemy nawożenia siarką na tle dawek azotu – doświadczenie nienawadniane.

Źródło: opracowanie własne; *te same oznaczenia literowe oznaczają brak istotnych różnic między kolumnami; pionowy słupek w kolumnie określa wielkość standardowego błędu średniej.

Saldo bilansowe (N_b) jest pierwszym, wynikowym elementem oceny gospodarki N w danym okresie wegetacji rośliny uprawnej. Wartości dodatnie informują o niewykorzystaniu zasobów składnika, czyli N_{in14} okresie od BBCH 14 do BBCH 61, a ujemne o przyroście tych zasobów (N_{g61}). W omawianym przypadku, źródłem przyrostu składnika jest gleba. Relację między obu wskaźnikami przedstawiono w formie graficznej (ryc. Z4.51). Z analizy zachodzącej prawidłowości wynika, że wzrost N_b prowadzi do liniowego spadku N_{g61} , czyli masy N uwolnionego z zasobów glebowych w okresie od BBCH 14 do BBCH 61. Uzyskane wyniki wskazują, że w stanie równowagi między N_{in14} a N_{in61} , czyli dla $N_b = 0$, zasoby N w systemie gleba/roślina zwiększyły się o $75,4 \text{ kg ha}^{-1}$. Proces uwalniania N z zasobów glebowych występował aż do $N_b = 145 \text{ kg N ha}^{-1}$. Opisaną zależność potwierdza ujemna korelacja N_b z oboma wskaźnikami efektywności azotu, zwłaszcza z EN_{in14} ($r = -0,93^{***}$). Jednocześnie wskaźnik ten, za wyjątkiem R, był dodatnio związany ze wszystkimi elementami struktury plonu, zwłaszcza z LZR i LZK ($r = 0,68^{***}$). Natomiast N_{g61} poza dodatnią korelacją z N_{in61} i EN_{in14} i nie wykazał związku z N_{in61} i EN_{in61} , a także z elementami struktury plonu.

4.12a.2. Po kwitnieniu – nalewanie ziarna

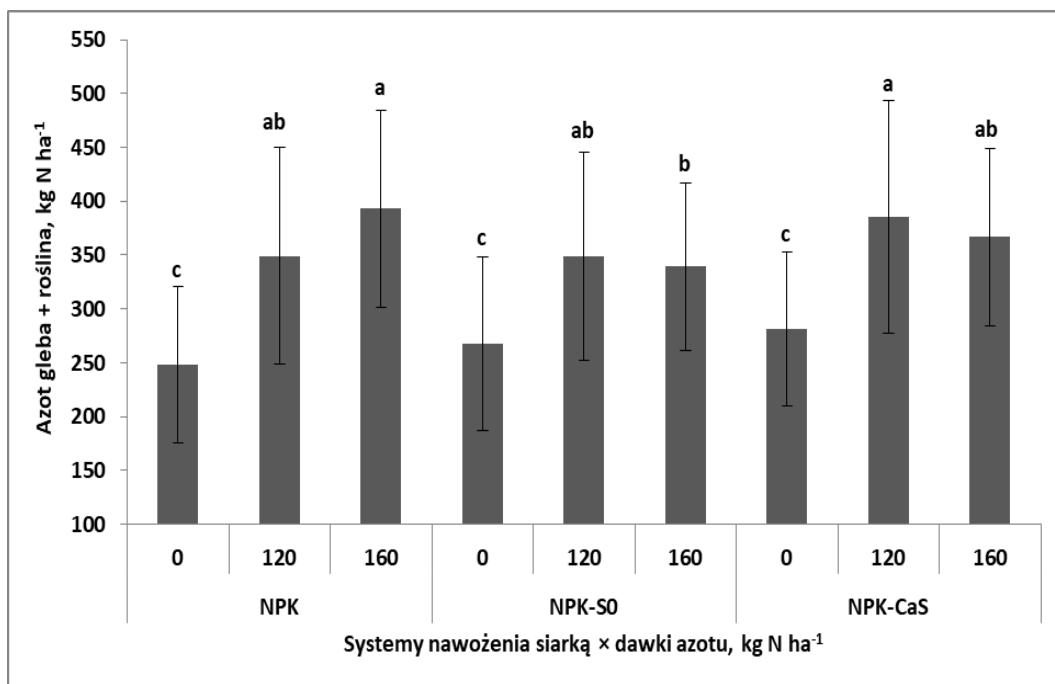
Wszystkie analizowane wskaźniki gospodarki azotem po kwitnieniu wykazały zależność od współdziałania $SYS \times ND$. Tylko dwa wskaźniki efektywności, czyli ETN_{in61} i EN_{in89} były istotnie zależne od współdziałania $Lata \times SYS \times ND$ (zał. 4.23a.). Największą wartość współczynnika zmienności (WZ), wielokrotnie przekraczająca 35%, stwierdzono dla N_b . Także bardzo dużą zmienność stwierdzono dla N_{g89} (> 35%). Małą zmienność (< 15%) odnotowano tylko dla EN_{in89} . Dla pozostałych cech wartości WZ mieściły się w zakresie średniej zmienności.

Spośród siedmiu analizowanych wskaźników gospodarki azotem w kukurydzy tylko trzy istotnie wykazały istotny i dodatni związek z plonem ziarna (zał. 4.23c). Stwierdzenie to odnosi się do N uruchomionego z zasobów glebowych w okresie BBCH 61-89, czyli dla N_{g89} oraz dla masy N w układzie gleba – roślina w okresie BBCH 61 – 89, czyli dla N_{in89} . Natomiast między EN_{gr89} a PLZ zachodził ujemny związek korelacyjny. Plon ziarna zależał od N_{in89} , a przebieg tej zależności był zgodny z funkcją kwadratową:

$$PLZ = 0,000027N_{in89}^2 + 0,025N_{in89} + 2,55 \text{ dla } n = 27, R^2 = 0,55 \text{ i } p \leq 0,04$$

Z równania tego wynika, że maksymalny plon ziarna, wynoszący $8,56 \text{ t ha}^{-1}$ uzyskano dla $N_{in89} = 463 \text{ kg N ha}^{-1}$. Takie wartości dla tej cechy odnotowano tylko w 2022.

Masa azotu w systemie gleba – roślina, czyli N_{in89} , zależała istotnie od współdziałania $SYS \times ND$ (tab. 4.23a). Istotnym czynnikiem wywołującym zmienność tego wskaźnika były lata (tab. 4.23). Należy podkreślić, że w pierwszym roku badań odnotowano najmniejszą wartość tej cechy, ponad 2-krotnie mniejszą niż w 2022 ($197,3$ vs. $492,2 \text{ kg N ha}^{-1}$). W porównaniu do N_{in61} w 2020 masa N w systemie gleba/roślina w stadium dojrzałości fizjologicznej kukurydzy zwiększyła się o 6,6%, w 2021 o 43,2%, a w 2022 aż o 73,9%. Spośród systemów nawożenia siarką, największa, średnią wartość N_{in89} odnotowano dla NPK-CaS, lecz różnica w stosunku do NPK wynosiła zaledwie $+14,4 \text{ kg N ha}^{-1}$. Wpływ dawek N na N_{in89} istotnie zależał od systemu nawożenia siarką (ryc. 4.57). Wartości wskaźnika na kontroli N nie wykazały istotnej zmienności na badanych obiektach. Natomiast reakcja na dawki N była odmienna. Na NPK zachodził istotny wzrost, zgodny z wielkością dawek N, a na obiektach z siarką, wzrost dotyczył różnicy w stosunku do tylko kontroli N.



Ryc. 4.57. Masa azotu w systemie gleba-roślina w stadium dojrzałości fizjologicznej kukurydzy (N_{in89}) w reakcji na system nawożenia azotem na tle dawek azotu – doświadczenie nienawadniane.

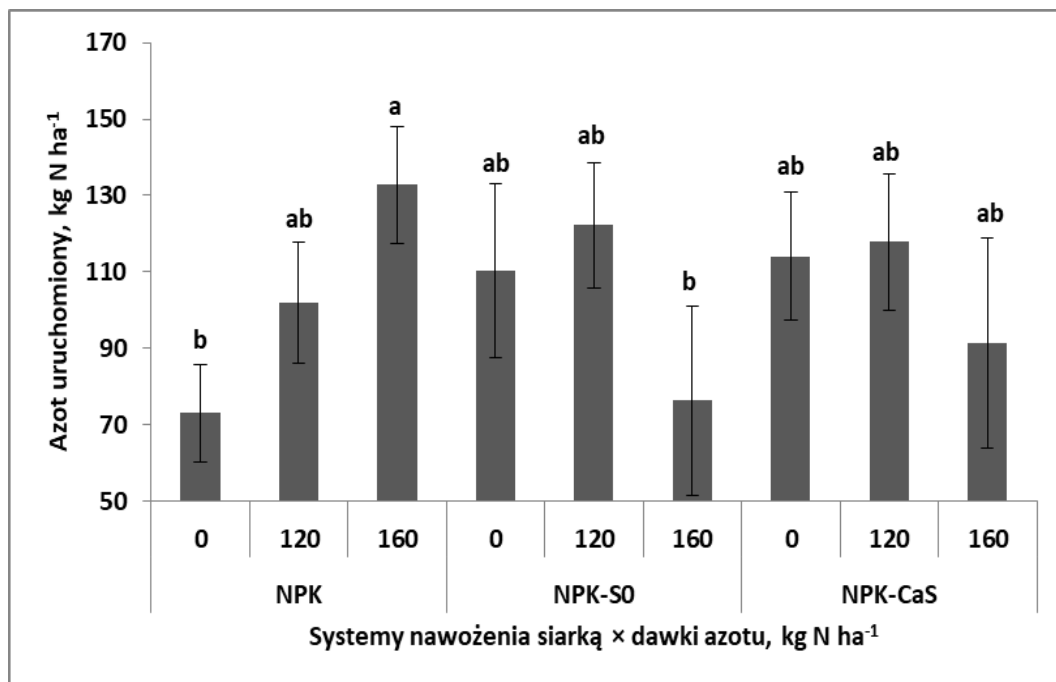
Źródło: opracowanie własne; ^ate same oznaczenia literowe oznaczają brak istotnych różnic między kolumnami; pionowy słupek w kolumnie określa wielkość standardowego błędu średniej.

Wartości N_{in89} dodatkowo korelowały z masą N uwolnioną z zasobów glebowych w okresie nalewania (BBCH 61 – BBCH 89), czyli N_{g89} , a także z ETN_{in61} a jednocześnie ujemnie z EN_{gr89} . Związki korelacyjne z plonem ziarna były istotne oraz ze wszystkimi elementami struktury plonu, za wyjątkiem R. Najsilniejszy związek odnotowano z MTZ ($r = 0,81^{***}$) (zał. 4.23c). Wskaźnik, jakim jest N_{g89} , wykazał ekstremalnie dużą zmienność w latach, lecz istotnie kształtował N_{in89} :

$$N_{in89} = N_{g89} + 186 \text{ dla } n = 27, R^2 = 0,82 \text{ i } p \leq 0,001$$

Masa N uruchomiana w okresie nalewania ziarna (N_{g89}) w 2022 była ponad 2-krotnie większa niż w 2021 i 16-krotnie w stosunku do 2020 (tab. 4.23). Pomimo tak dużych wahań, zmienność omawianej cechy zależała od współdziałania $SYS \times ND$ (ryc. 4.58). Wartości N_{g89} na kontroli N wzrastały w kierunku $NPK < NPK-S0 = NPK-CaS$. Progresywny wzrost N_{g89} w stosunku do kontroli N wystąpił tylko na NPK. Na obiektach z siarką jedyną istotną zmianą w stosunku do kontroli N był istotny spadek wartości N_{g89} na kombinacji 160 kg N ha⁻¹ w stosunku do kontroli N. Wskaźnik ten poza omówionym, silnym związkiem z N_{in89} , istotnie i dodatkowo kształtował ETN_{in61} ,

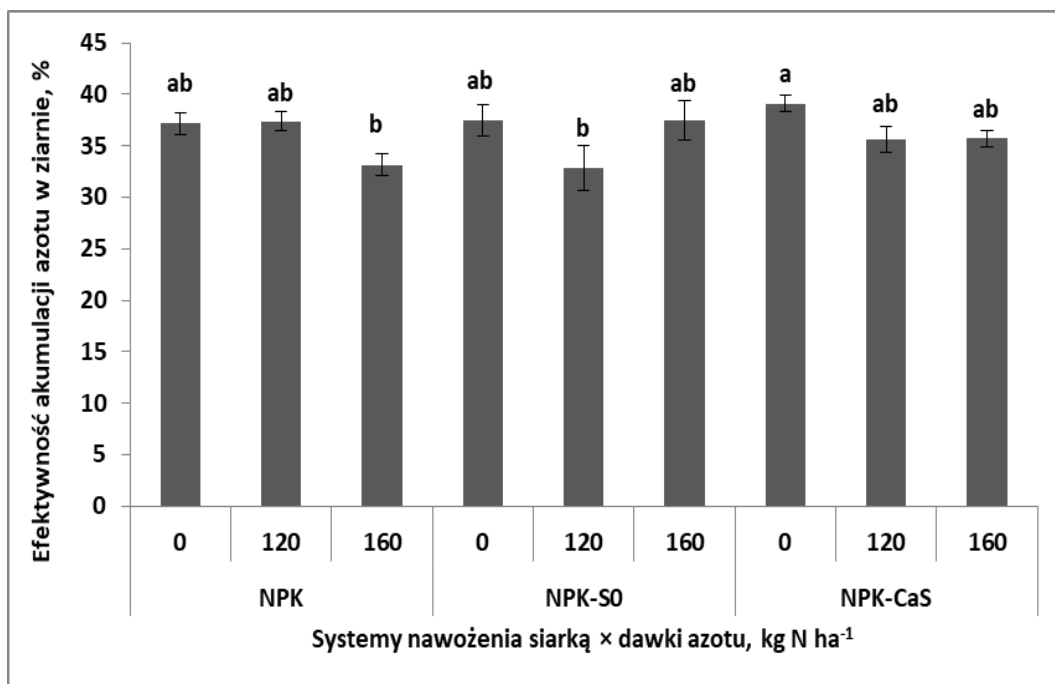
lecz jednocześnie ujemnie EN_{gr89} . Analogicznie, jak dla N_{in89} odnotowano silny dodatni związek z MTZ, znacznie słabszy z LZR, LZK i LZ (zał. 4.23c).



Ryc. 4.58. Masa azotu *uruchomionego* w systemie gleba-roślina w okresie nalewania ziarna (N_{g89}) w reakcji na system nawożenia siarką na tle dawek azotu – doświadczenie nienawadniane.

Źródło: opracowanie własne; *te same oznaczenia literowe oznaczają brak istotnych różnic między kolumnami; pionowy słupek w kolumnie określa wielkość standardowego błędu średniej.

Ostatnim wskaźnikiem gospodarki kukurydzy azotem, który oddziaływał istotnie, lecz ujemnie na PLZ po kwitnieniu, jest efektywność akumulacji N w ziarnie (EN_{gr89}) (zał. 4.23c). Wskaźnika ten prezentował zmienne wartości w latach badań. Największą efektywność odnotowano w 2020 (47,2%) a najmniejszą w 2022, w którym była ponad 20% mniejsza (26,9%). Wskaźnik, jakim jest EN_{gr89} wykazał zależność od SYS i kombinacji azotowych, lecz zmienność ta była nieznaczna (ryc. 4.59). Największą wartość wskaźnika odnotowano na kontroli N na obiekcie NPK-CaS (39%). Na NPK odnotowano istotny spadek wartości EN_{gr89} z 37% na kontroli N do 33% na kombinacji 160 $kg N ha^{-1}$. Na NPK-S0 spadek względem kontroli N odnotowano na kombinacji 120 $kg N ha^{-1}$. Na NPK-CaS nawożenie N spowodowało 3-procentowy spadek względem kontroli N.



Ryc. 4.59. Efektywność akumulacji azotu przez kukurydzę w ziarnie (EN_{gr89}) w reakcji na systemy nawożenia siarką na tle dawek azotu – doświadczenie nienawadniane.

Źródło: opracowanie własne; ^ate same oznaczenia literowe oznaczają brak istotnych różnic między kolumnami; pionowy słupek w kolumnie określa wielkość standardowego błędu średniej.

Saldo bilansowe N w okresie nalewania ziarna (N_{b89}), analogicznie, jak w okresie BBCH14 – BBCH 89, wykazało ujemny związek z N_{g89} (zał. 4.23c). Wartość tej cechy w stanie równowagi N_{in61} i N_{in89} , czyli $N_{b89} = 0$, wyniosła $59,9 \text{ kg N ha}^{-1}$ (ryc. Z4.52.). Natomiast brak netto przyrostu N_{g89} ujawnił się w sytuacji, gdy N_{b89} osiągnęło wartość 56 kg N ha^{-1} . Wskaźnik ten był ujemnie skorelowany z N_{in89} , a zwłaszcza ETN_{in61} ($r = -0,95^{***}$). Jednocześnie odnotowano istotny i dodatni wpływ na EN_{gr89} ($r = 0,64^{***}$). Związek z elementami struktury plonu był ujemny, a najsilniejszy i jedynie istotny okazał się dla MTZ ($r = -0,56^{**}$) (zał. 4.23c).

Tabela 4.23. Wskaźniki gospodarki azotem w kukurydzy w okresie przed kwitnieniem (BBCH 15 –61) i po kwitnieniu (BBCH 61 – 89)

– doświadczenie nienawadniane.

Czynnik	Poziom Czynnika	N _{in14}	N _{b61}	N _{g61}	N _{in61}	EN _{in14}	EN _{in61}				ETN	ETN		
								N _{b89}	N _{g89}	N _{in89}	in61	in89	EN _{gr61}	EN _{gr89}
		kg N ha ⁻¹						kg N ha ⁻¹			%			
Lata (L)	2020	125,7 ^b	-27,4 ^c	58,8 ^b	185 ^c	129 ^a	83,2 ^a	5,9 ^a	12,7 ^c	197,3 ^c	100,1 ^b	90,5 ^a	52,0	47,2 ^a
	2021	176,7 ^a	63,1 ^a	35,5 ^b	212 ^b	77 ^c	56,1 ^c	2,5 ^a	91,5 ^b	303,6 ^b	102,9 ^b	68,8 ^c	52,0	34,5 ^b
	2022	169,8 ^a	-0,3 ^b	113,3 ^a	283 ^a	104 ^b	60,5 ^b	-132,9 ^b	209,1 ^a	492,2 ^a	153,0 ^a	84,5 ^b	48,9	26,9 ^c
F _{ob} , P		47,4 ^{***}	52,4 ^{***}	30,1 ^{***}	59,6 ^{***}	37,0 ^{***}	222 ^{***}	98,4 ^{***}	169 ^{***}	649 ^{***}	79,3 ^{***}	357 ^{***}	1,2 ^{ns}	274 ^{***}
Systemy nawożenia siarką (SYS)	NPK	146,7 ^b	4,2 ^b	80,8 ^a	228	107	64,6 ^b	-31,3	102,6	330,1 ^{ab}	113,6	79,2 ^b	49,7	35,9
	NPK-S ⁰	167,2 ^a	27,7 ^a	48,3 ^b	215	97	66,5 ^{ab}	-46,1	103,0	318,5 ^b	121,1	81,6 ^a	50,5	35,9
	NPK-CaSO ₄	158,3 ^{ab}	3,6 ^b	78,5 ^a	237	107	68,7 ^a	-47,1	107,7	344,5 ^a	121,4	82,9 ^a	52,7	36,8
F _{ob} , P		6,5 ^{***}	4,6 [*]	6,2 ^{**}	2,6 ^{ns}	1,8 ^{ns}	4,5 [*]	1,2 ^{ns}	0,1 ^{ns}	4,9 ^{**}	1,8 ^{ns}	9,8 ^{***}	0,9 ^{ns}	0,8 ^{ns}
Dawki azotu (ND) kg N ha ⁻¹	0	98,2 ^c	-20,0 ^c	68,3 ^{ab}	166 ^b	123 ^a	71,9 ^a	-49,5	99,2	265,6 ^b	127,8 ^a	80,6	57,2 ^a	37,9 ^a
	40	164,8 ^b	7,5 ^b	82,4 ^a	247 ^a	103 ^b	65,0 ^b	-46,4	114,0	361,2 ^a	116,4 ^b	81,7	48,4 ^b	35,3 ^b
	80	209,2 ^a	47,9 ^a	57,0 ^b	266 ^a	85 ^c	62,9 ^c	-28,5	100,1	366,3 ^a	111,8 ^b	81,4	47,3 ^b	35,4 ^b
F _{ob} , P		194 ^{***}	28,3 ^{***}	3,0 ^{ns}	64,6 ^{***}	19,8 ^{***}	23,1 ^{***}	2,0 ^{ns}	1,2 ^{ns}	93,6 ^{***}	6,1 ^{***}	0,9 ^{ns}	11,5 ^{***}	5,6 ^{**}
Średnia		157,4	11,8	69,2	226,6	103,5	66,6	-41,5	104,4	331,0	118,7	81,3	51,0	36,2
Odchylenie standardowe		31,6	29,7	22,8	37,1	16,3	7,7	74,5	88,7	136,0	31,8	10,3	10,0	9,0
WZ, %		20,1	251,3	33,0	16,4	15,8	11,6	179,5	84,9	41,1	26,8	12,7	19,5	24,7

Zródło: opracowanie własne; ***, **, * - istotność na poziomie 0,001; 0,01; 0,05; ns – brak istotnego działania czynnika; ^a – ta sama litera w rzędzie oznacza brak istotnego różnicowania cechy w kolumnie dla danego czynnika; WZ – współczynnik zmienności; N – zakumulowany azot; 14, 61, 89 – fazy rozwoju kukurydzy w skali BBCH; N_{in14}, N_{in61}, N_{in89} – masa azotu w układzie gleba-roślina w stadium BBCH 14, 61 i 89; N_{b61}, N_{b89} – bilans azotu w układzie gleba-roślina w okresie BBCH 14 - BBCH 61 oraz BBCH 61 – BBCH 89; N_{g61}, N_{g89} – azot uruchomiony z zasobów glebowych w okresie BBCH 14 – 61 oraz BBCH 61-89; EN_{in14}, EN_{in61}, EN_{in89} – efektywność akumulacji w biomase dla N_{in14} i N_{in61}, N_{in89}; ETN_{in61}, ETN_{in89} – efektywność całkowita akumulacji N w biomase dla N_{in61} i N_{in89}; EN_{gr61}, EN_{gr89} – efektywność akumulacji N w ziarnie dla N_{in61} i N_{in89}; EN_{gr61}.

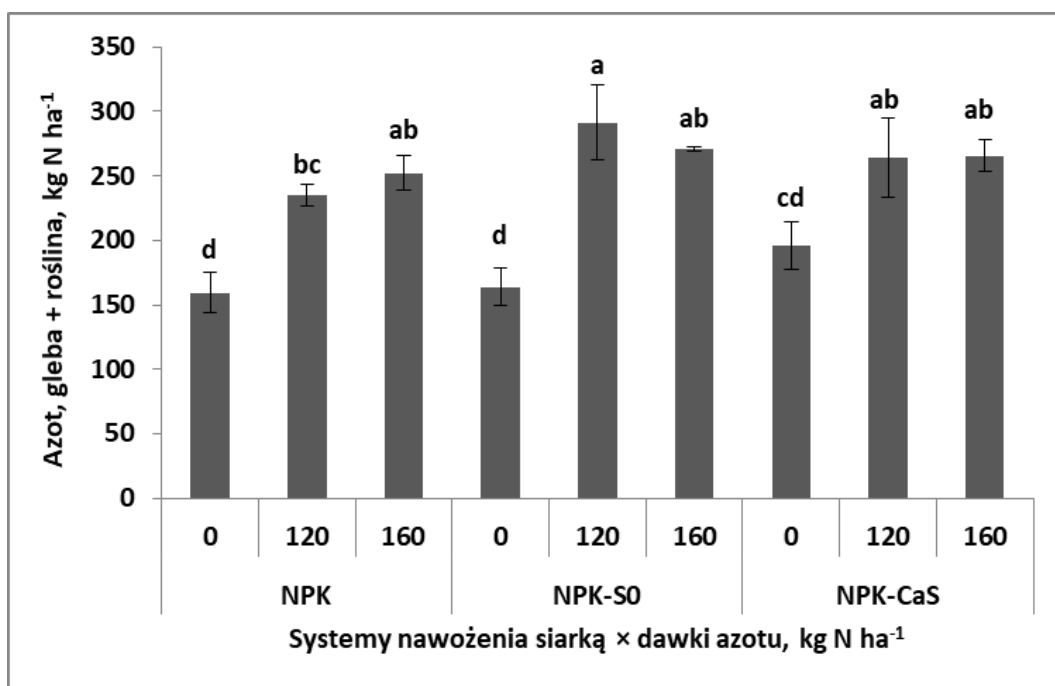
4.12b. Doświadczenie nawadniane

4.12b.1. Przed kwitnieniem, BBCH 14 – BBCH 61

Z sześciu analizowanych wskaźników gospodarki N w okresie od BBCH 14 do BBCH 61, tylko EN_{in14} nie wykazał zależności od współdziałania $Lata \times SYS \times ND$. Zmienność tej cechy zależała tylko od współdziałania $SYS \times ND$ (tab. 4.24a). Współczynnik zmienności (WZ) dla czterech wskaźników, to jest N_{in14} , N_{g61} , EN_{in14} , a zwłaszcza N_{b61} (211%), przekraczał 35%. W średniej klasie zmienności odnotowano obecność N_{in61} i EN_{in61} .

Spośród badanych wskaźników, istotną i dodatnią korelację z plonem ziarna odnotowano dla N_{in61} , N_{g61} a ujemną dla N_{b61} (zał. 4.24b). Jednocześnie nie stwierdzonego istotnego wpływu N_{in14} zarówno na N_{in61} , jak i PLZ, pomimo dodatniego wpływu na R, LZR i LZK, lecz nie na LZ i MTZ. W dodatku N_{in14} wpływał ujemnie na N_{g61} . Zależność plonu ziarna od N_{in61} przedstawia poniższe równanie:

$$PLZ = 0,02N_{in61} + 4,41 \text{ dla } n = 27, R^2 = 0,61 \text{ i } p \leq 0,001$$



Ryc. 4.60. Masa azotu w systemie gleba-roślina przed kwitnieniem (N_{in61}) w reakcji na systemy nawożenia siarką na tle dawek azotu – doświadczenie nawadniane.

Źródło: opracowanie własne; ^ate same oznaczenia literowe oznaczają brak istotnych różnic między kolumnami; pionowy słupek w kolumnie określa wielkość standardowego błędu średniej.

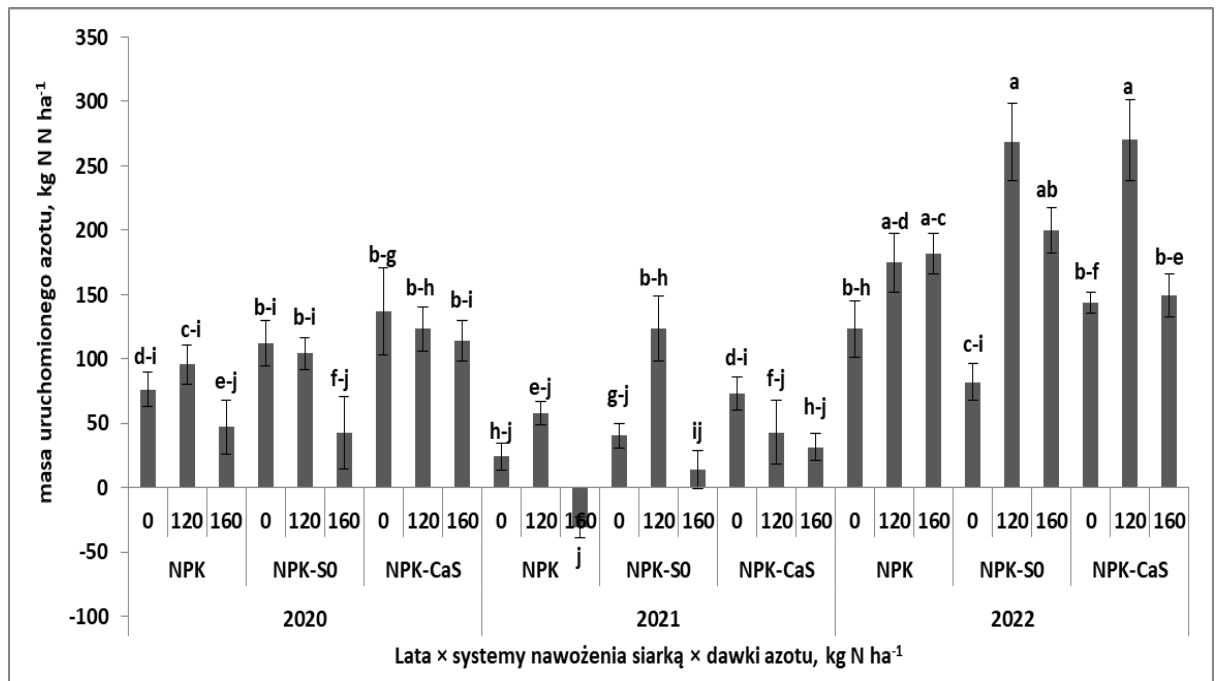
Otrzymana liniowa zależność informuje, że zmienność plonu ziarna kukurydzy w 61% wyjaśnia zmienność wskaźnika N_{in61} . Największą wartość wskaźnika odnotowano w 2022, a istotnie mniejszą w pozostałych latach badań. Różnica w stosunku do 2021 wyniosła $82,8 \text{ kg N ha}^{-1}$ i $78,8 \text{ kg N ha}^{-1}$ w stosunku do 2020 (tab. 4.24). Wpływ dawek N na wartość tej cechy był odmienny na obiektach z siarką (ryc. 4.60). Na kontroli N różnice między obiektami były nieznaczne i nieistotne. Na każdym obiekcie odnotowano istotny wzrost N_{in61} na kombinacji 120 kg N ha^{-1} w stosunku do kontroli N. Natomiast reakcję na 160 kg N ha^{-1} względem 120 kg N ha^{-1} , odnotowano tylko na NPK. Wartość omawianej cechy zależała istotnie i dodatnio od N_{g61} a ujemnie od N_{b61} . Pierwszą zależność przedstawia równanie:

$$N_{in61} = N_{g61} + 161,3 \text{ dla } n = 27, R^2 = 0,55 \text{ i } p \leq 0,001$$

Otrzymana funkcja wskazuje na duży, istotny wpływ N_{g61} na masę N w systemie gleba/roślina przed kwitnieniem kukurydzy. Wskaźnik ten istotnie kształtował plon ziarna, lecz w pierwszej kolejności, jak przedstawiono w powyższym równaniu, poprzez wpływ na masę (zał. 4.24b). Wskaźnik ten był ujemnie skorelowany z N_{b61} ($r = -0,91^{***}$). Ponadto wykazał istotny i dodatni wpływ na oba wskaźniki efektywności, zwłaszcza silny na EN_{in14} ($r = 0,86^{***}$). Dodatni i istotny związek korelacyjny stwierdzono dla LZ, a zwłaszcza MTZ (zał. 4.24b).

Wartości N_{g61} wykazywały istotną zależność od współdziałania $\text{Lata} \times \text{SYS} \times \text{ND}$, lecz głównym czynnikiem zmienności były lata (tab. 4.24). Najmniejsza masa N, odnotowana w 2021, była ponad 4-krotnie mniejsza od stwierdzonej w 2022. Systemy nawożenia siarką istotnie kształtowały wielkość tego wskaźnika. Średnio dla lat i dawek N, przyrost masy N na NPK-S0 w stosunku do NPK wyniósł 31,8% and na NPK-CaS osiągnął aż 44,8%. Wartości wskaźnika N_{g61} wykazały zróżnicowaną reakcję na systemy nawożenia siarką na tle dawek N (ryc. 4.61). W 2020 wartości wskaźnika na kontroli N były wysokie, zwłaszcza na NPK-CaS, która była największa. Tylko na NPK odnotowano wzrost wartości wskaźnika na kombinacji 120 kg N ha^{-1} a spadek na 160 kg N ha^{-1} w stosunku do kontroli N. Na obiektach z siarką zastosowanie N, a zwłaszcza w dawce 160 kg N ha^{-1} powodowało istotny spadek wartości N_{g61} . W 2021 odnotowano najmniejsze wartości omawianej cechy. Masa uruchomionego N na kontroli N była dodatnia, aczkolwiek mała. Największe wartości wskaźnika notowano na kombinacji 120 kg N ha^{-1} , zwłaszcza na NPK-S0. Na obiekcie NPK i kombinacji 160 kg N ha^{-1} odnotowano wartości ujemne. Na obiekcie NPK-CaS ujawnił się ten sam trend co w

2020. W 2022 nawożenie N prowadziło do wzrostu N_{g61} w stosunku do kontroli N. Na obiektach z siarką nastąpiła kulminacja wzrostu na kombinacji 120 kg N ha⁻¹. Większa dawka N zmniejszyła skalę wzrostu N_{g61} , jak odnotowano na NPK-S0 lub zredukowała do poziomu kontroli N, jak na obiekcie NPK-CaS.



Ryc. 4.61 Masa azotu *uruchomionego* w systemie gleba-roślina w okresie przed kwitnieniem (N_{g61}) w latach reakcji na systemy nawożenia siarką na tle dawek azotu – doświadczenie nawadniane.

Źródło: opracowanie własne; *te same oznaczenia literowe oznaczają brak istotnych różnic między kolumnami; pionowy słupek w kolumnie określa wielkość standardowego błędu średniej.

Istotnym aspektem analizy N_{g61} jest związek tej cechy z wartościami salda bilansowego N, czyli N_{b61} (zał. 4.24b). Zależność ta była wysoce istotna, lecz ujemna ($r = -0,91^{***}$). Jednocześnie odnotowano istotny, słaby a do tego ujemny związek z PLZ i LZ, lecz jednocześnie dodatni z LZR i LZK. W stanie równowagi między N_{in14} i N_{in61} , czyli dla $N_{b61} = 0$, wartość N_{g61} wyniosła 72,7 kg N ha⁻¹. Natomiast wartość $N_{b61} = 102,4$ sygnalizuje brak uruchomienia N z zasobów glebowych (ryc. Z4.53).

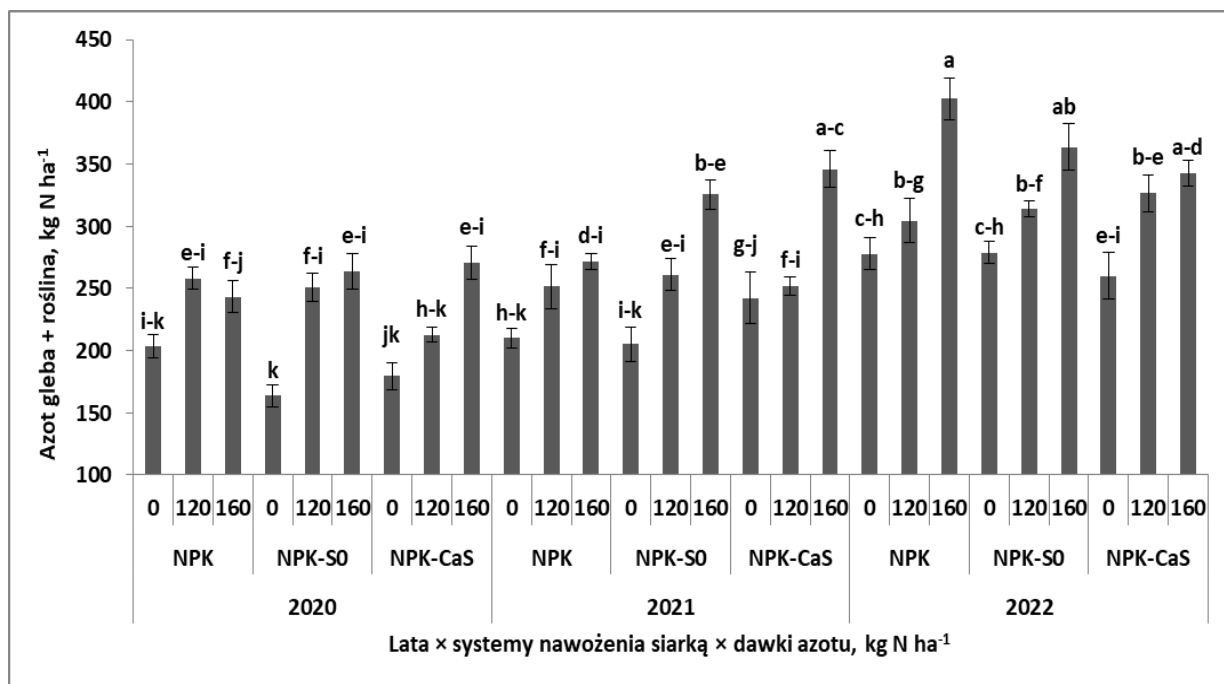
4.12b.2. Po kwitnieniu – nalewanie ziarna

Współdziałania Lata × SYS × ND określało wartość pięciu z siedmiu wskaźników gospodarki N w kukurydzy w okresie nalewania ziarna. Wyjątkiem była ETN_{in89} , której wartości kształtowało współdziałanie Lata × ND. Drugim wskaźnikiem był EN_{gr89} , którego zmienność zależała od Lat i ND, lecz nie od współdziałania między tymi czynnikami (zał. 4.24a; tab. 4.24). Współczynnik zmienności (WZ) dla ETN_{in89}

był mniejszy od 10%. Natomiast dla N_{b89} i N_{g89} wartości współczynnika były ekstremalnie wysokie, przekraczając 100% (tab. 4.24).

Spośród siedmiu analizowanych wskaźników istotnie na PLZ oddziaływał tylko jeden, a mianowicie N_{in89} . Siła tej zależności była bardzo duża, gdyż wskaźnik ten tłumaczy aż w 74% zmienność plonu ziarna. Otrzymano równanie:

$$PLZ = 0,027N_{in89} + 1,99 \text{ dla } n = 27, R^2 = 0,74 \text{ i } p \leq 0,001$$



Ryc. 4.62. Masa azotu w systemie gleba-roślina w okresie nalewania ziarna (N_{in89}) w reakcji na system nawożenia siarką na tle dawek azotu na tle dawek azotu – doświadczenie nawadniane.

Źródło: opracowanie własne; ^ate same oznaczenia literowe oznaczają brak istotnych różnic między kolumnami; pionowy słupek w kolumnie określa wielkość standardowego błędu średniej.

Należy zwrócić uwagę i podkreślić fakt, że N_{in89} wykazał duży wpływ na kluczowe elementy struktury plonu, czyli LZ ($r = 0,75^{***}$) oraz MTZ ($r = 0,78^{***}$) (zał. 4.24c.). Istotnym czynnikiem zmienności N_{in89} były lata (tab. 4.24). Wskaźnika uzyskał największą wartość w 2022, która była istotnie większa w stosunku do 2020 o 40,3% a do 2021 o 21,3%. W porównaniu do N_{in61} w 2020 masa N w systemie gleba/roślina zwiększyła się o 9,1%, w 2021 o 28,6% a w 2022 o 11%. O zmienności N_{in89} decydowało współdziałania Lata \times SYS \times ND (ryc. 4.62). Nawożenie N prowadziło do wzrostu wartości omawianego wskaźnika, lecz zmiennie w latach i w zależności od systemu nawożenia siarką. W 2020 nawożenie N zwiększało N_{in89} , lecz progresywny wzrost dla dawek N wystąpił tylko na NPK-CaS. Ten trend wzrostu

ujawnił się w obu kolejnych latach na NPK i NPK-S0. Na NPK-CaS w 2021 wzrost N_{in89} w stosunku do kontroli N nastąpił tylko na kombinacji 160 kg N ha⁻¹ a w 2022 na obu, lecz bez istotnych różnic między kombinacjami.

N_{in89} nie wykazał istotnego związku korelacyjnego z innymi wskaźnikami gospodarki N w okresie nalewania ziarna (zał. 4.23c). Wskaźnik ten istotnie zależał od N_{in61} , co przedstawia uzyskane równanie:

$$N_{in89} = 0,6N_{in61} + 129,1 \text{ dla } n = 27, R^2 = 0,51 \text{ i } p \leq 0,001$$

Dwa ważne wskaźniki gospodarki N, jakimi są saldo bilansowe (N_{b89}) i netto przyrost N z zasobów glebowych (N_{g89}) nie wykazały wpływu na N_{in89} , lecz były istotnie, wzajemnie ujemnie skorelowane (zał. 4.24c; ryc. Z4.54). W stanie równowagi między N_{in61} a N_{in89} , czyli dla $N_{b89} = 0$, netto masa N uwolniona z zasobów glebowych wyniosła 42,4 kg ha⁻¹. Wzrost wartości N_{b89} do 41,6 kg N ha⁻¹ prowadził do redukcji N_{g89} do 0,0 kg N ha⁻¹, a powyżej tej wartości notowano wtórne unieruchomienie N w glebie. Pierwszy z tych wskaźników, czyli N_{b89} , wykazał ujemny wpływ na efektywność akumulacji N_{in61} w systemie gleba/roślina w stadium BBCH 89, jak i ziarnie ($r = -0,95^{***}$ dla ETN_{in61} i $-0,75^{***}$ dla EN_{gr61}). Drugi z tej grupy wskaźników, czyli N_{g89} był dodatnio i silnie skorelowany z ETN_{in61} ($r = 0,86^{***}$) i ujemnie, lecz słabo z EN_{gr61} . Ponadto, za wyjątkiem LZR nie wykazał związku z plonem i elementami struktury plonu.

Tabela 4.24. Wskaźniki gospodarki azotem w kukurydzy w okresie przed kwitnieniem (BBCH 15 –61) i po kwitnieniu (BBCH 61 – 89) – doświadczenie nawadniane.

Czynnik	Poziom Czynnika	N _{in14}	N _{b61}	N _{g61}	N _{in61}	EN _{in14}	EN _{in61}	N _{b89}	N _{g89}	N _{in89}	ETN		ETN	
											in61	in89	EN _{gr61}	EN _{gr89}
		kg N ha ⁻¹						%						
Lata (L)	2020	113,7 ^b	-61,0 ^b	94,5 ^b	208,3 ^b	172,4 ^b	84,0 ^a	-1,1	19,0 ^b	227,2 ^c	103,6	92,0 ^a	59,0 ^a	52,5 ^a
	2021	162,7 ^a	59,6 ^a	41,6 ^c	204,3 ^b	70,4 ^c	52,5 ^b	7,9	58,5 ^a	262,8 ^b	99,8	74,2 ^c	46,7 ^b	35,1 ^c
	2022	110,3 ^b	-131,5 ^c	176,8 ^a	287,1 ^a	228,8 ^a	83,9 ^a	11,0	31,7 ^b	318,8 ^a	101,8	86,3 ^b	49,2 ^b	42,4 ^b
F _{ob, P}		77,4 ^{***}	243 ^{***}	115 ^{***}	66,3 ^{***}	106 ^{***}	640 ^{***}	0,8 ^{ns}	8,2 ^{***}	112 ^{***}	0,4 ^{ns}	288 ^{***}	21,0 ^{***}	172 ^{***}
Systemy nawożenia siarką (SYS)	NPK	132,5 ^a	-27,5 ^a	83,1 ^b	215,7 ^b	140,9 ^b	74,0	-10,7	53,5 ^a	269,1	108,1	83,7 ^b	55,2 ^a	43,1
	NPK-S ⁰	132,6 ^a	-43,7 ^{ab}	109,5 ^a	242,1 ^a	154,2 ^{ab}	72,7	17,8	27,5 ^b	269,6	98,5	83,0 ^b	50,8 ^{ab}	43,6
	NPK-CaSO ₄	121,6 ^a	-61,6 ^b	120,3 ^a	242,0 ^a	176,6 ^a	73,6	10,7	28,3 ^b	270,2	98,7	85,8 ^a	48,9 ^b	43,4
F _{ob, P}		3,6 [*]	7,6 ^{***}	9,0 ^{***}	7,0 ^{**}	5,4 ^{**}	1,0 ^{ns}	4,6 [*]	4,4 [*]	0,1 ^{ns}	3,1 ^{ns}	7,1 ^{**}	5,2 ^{**}	0,2 ^{ns}
Dawki azotu (ND) kg N ha ⁻¹	0	83,1 ^c	-54,1 ^b	90,1 ^b	173,1 ^b	176,8 ^a	77,5 ^a	-8,6	51,4 ^a	224,5 ^c	108,9 ^a	81,2 ^b	52,2	39,7 ^c
	40	123,8 ^b	-71,3 ^b	139,8 ^a	263,6 ^a	180,1 ^a	73,0 ^b	31,8	6,5 ^b	270,1 ^b	92,1 ^c	85,7 ^a	50,4	47,0 ^a
	80	179,9 ^a	-7,4 ^a	83,1 ^b	263,0 ^a	114,7 ^b	69,8 ^c	-5,5	51,4 ^a	314,3 ^a	104,2 ^b	85,5 ^a	52,2	43,4 ^b
F _{ob, P}		213 ^{***}	28,4 ^{***}	23,6 ^{***}	82,3 ^{***}	22,4 ^{***}	29,7 ^{***}	10,6 ^{***}	13,5 ^{***}	106 ^{***}	7,7 ^{***}	22,5 ^{***}	0,6 ^{ns}	29,9 ^{***}
Średnia		128,9	-44,3	104,3	233,2	157,2	73,4	5,9	36,4	269,6	101,7	84,1	51,6	43,3
Odchylenie standardowe		50,3	93,2	72,8	67,4	82,9	16,1	42,6	48,2	57,1	18,2	8,2	10,1	8,2
WZ, %		39,0	210,5	69,8	28,9	52,8	22,0	720,5	132,4	21,2	17,8	9,7	19,6	18,8

Źródło: opracowanie własne; ***, **, * - istotność na poziomie 0,001; 0,01; 0,05; ns – brak istotnego działania czynnika; ^a – ta sama litera w rzędzie oznacza brak istotnego zróżnicowania cechy w kolumnie dla danego czynnika; WZ – współczynnik zmienności; N – zakumulowany azot; 14, 61, 89 – fazy rozwoju kukurydzy w skali BBCH; N_{in14}, N_{in61}, N_{in89} – masa azotu w układzie gleba-roślina w stadium BBCH 14, 61 i 89; N_{b61}, N_{b89} – bilans azotu w układzie gleba-roślina w okresie BBCH 14 - BBCH 61 oraz BBCH 61 – BBCH 89; N_{g61}, N_{g89} – azot uruchomiony z zasobów glebowych w okresie BBCH 14 – 61 oraz BBCH 61-89; EN_{in14}, EN_{in61}, EN_{in89} – efektywność akumulacji w biomase dla N_{in14} i N_{in61}, N_{in89}; ETN_{in61}, ETN_{in89} – efektywność całkowita akumulacji N w biomase dla N_{in61} i N_{in89}; EN_{gr61}, EN_{gr89} – efektywność akumulacji N w ziarnie dla N_{in61} i N_{in89}; EN_{gr61}.

5. Omówienie i dyskusja wyników

Główne pytania, które w świetle postawionej hipotezy badawczej i uzyskanych wyników wymagają odpowiedzi, są następujące:

1. Czy można zwiększyć efektywność azotu stosowanego w nawozach azotowych?
2. Czy wprowadzenie siarki do technologii produkcji kukurydzy zwiększy efektywność stosowanego azotu?
3. Czy forma chemiczna nośnika siarki ma istotne znaczenie w systemie nawożenia kukurydzy siarką?
4. Czy jest możliwe połączenie w systemie nawożenia kukurydzy siarką, siarki i wapnia?
5. Czy kontrola warunków wodnych w trakcie wegetacji kukurydzy poprzez deszczowanie wpłynie na skuteczność działania siarki, ewentualnie siarki i wapnia?
6. W jakim okresie wegetacji kukurydzy zasoby azotu w glebie są krytyczne dla formowania elementów struktury plonu, a tym samym dla plonu ziarna?

Kluczowe dla praktyki rolniczej pytania brzmią:

7. Czy poprzez zastosowanie siarki w technologii produkcji kukurydzy na ziarno można uzyskać większy plon ziarna?
8. Czy poprzez zastosowanie siarki można zoptymalizować dawki nawozowe azotu?

5.1. Plon

5.1.1. Plon ziarna

Plony ziarna kukurydzy uzyskane w warunkach prowadzenia doświadczeń polowych wykazały dużą zmienność w kolejnych latach badań, a główną przyczyną były warunki pogodowe w sezonie wegetacyjnym. Dominacja czynnika pogodowego w produkcji kukurydzy jest naturalna w warunkach glebowo-klimatycznych Polski (Ptaszyńska i Sulewska, 2008; Czarnecka i Nidzgorska-Lencewicz, 2012; Kuchar i in., 2021). Należy wyraźnie podkreślić, że plony ziarna uzyskane na absolutnej kontroli nawozowej (bez azotu oraz siarki) były duże i wynosiły 5,8; 6,1; 6,3 t ha⁻¹, odpowiednio w latach 2020, 2021 i 2022. Nawadnianie zwiększyło plon ziarna na tych kombinacjach plon odpowiednio do 7,5; 7,5; 8,2 t ha⁻¹. Netto przyrost plonów tylko w wyniku optymalizacji warunków wodnych był wysoce stabilny w latach badań i mieścił się w zakresie od 1,4 (2021) poprzez 1,7 (2020) do 1,9 (2022) t ha⁻¹. Uzyskane plony

kukurydzy w stanowisku nawadnianym i nienawożonym azotem były większe, zwłaszcza w latach 2020 i 2022, od średnich plonów w Polsce (tab. 5.1). Skala uzyskanego przyrostu plonu ziarna w wyniku nawadniania wskazuje na:

- 1) niedobór wody, który występował w każdym z lat badań (tab. 3.1);
- 2) dostatecznie wysoką, jak na warunki glebowe Polsce, naturalną produktywność stanowisk (tab. 2.1).

Nieliczne badania w Polsce nad reakcją kukurydzy na nawadnianie potwierdzają skuteczność tego zabiegu produkcyjnego. Kukurydza jest rośliną wrażliwą na niedobór wody w całym okresie wegetacji, lecz największe straty plonu występują w okresie od wyrzucania wiechy (BBCH 51) do dojrzałości wodnistej ziarniaka (BBCH 71) (Tollenaar i Lee, 2002; Nielsen i in., 2010). W Polsce okres ten przypada na lipiec i początek sierpnia (Szulc i in. 2020). Największą skuteczność nawadniania uzyskuje się, jak wykazały wieloletnie badania prowadzone w regionie Kujawsko-Pomorskim, w latach z niedoborem opadów, w których zabieg nawadniania przeprowadzono przed tym okresem wegetacji (Dudek i in., 2009; Żarski in., 2013). Badania własne potwierdziły cytowane wyniki badań. Deszczowanie kukurydzy, począwszy od czerwca aż do sierpnia, poprawiało warunki wodne gleby, wynika z wartości wskaźnika hydrotermicznego. Tylko w sierpniu 2020 i 2022 deszczowanie, pomimo wskazań miernika wilgotności wody w glebie, nie poprawiło warunków wodnych, co najmniej w stopniu optymalnym (tab. 3.1). Przyczyną były bardzo duże temperatur, powyżej 20 °C (ryc. 3.1).

Stosowanie azotu istotnie zwiększyło plony ziarna. Jest to naturalna reakcja tej wysokopleniającej rośliny, notowana zarówno w Polsce, jak i na świecie (Gołębiowska i Wróbel, 2009). Halvorson i in. (2014) wykazali, że w warunkach nawadniania plon ziarna i słomy kukurydzy wzrastał progresywnie ze wzrostem dawki azotu. Optymalna dawka (N_{opt}) dla maksymalnego plonu ziarna, wynoszącego 14.3 t ha⁻¹, osiągnęła 254 kg N ha⁻¹. W przeprowadzonych badaniach własnych optymalne dawki azotu były duże mniejsze i istotnie zależały od systemu nawożenia siarką. Na obiekcie NPK-S0 plony wzrastały progresywnie z dawką azotu, osiągając 8,1 t ha⁻¹ na kombinacji 200 kg N ha⁻¹. Ten sam poziom plonu uzyskano na obiekcie NPK-CaS, lecz przy dawce 120 kg N ha⁻¹, co było o 16 kg mniej w porównaniu do tego samego plonu na obiekcie NPK, lecz przy dawce 136 kg N ha⁻¹. W warunkach nawadniania plony ziarna wynosiły, odpowiednio 10,5; 10,0 i 10,1 dla N_{opt} kształtującej się, jak 154, 123 i 119 kg N ha⁻¹. Produktywność brutto azotu dla podanego przykładu (Halvorson i in., 2014) wyniosła 56,3 kg ziarna kg⁻¹

¹ N nawozowego. Jest to wartość bliska optymalnej w warunkach amerykańskich, która wynosi 55 kg ziarna kg⁻¹ N nawozowego (DeBruin i in., 2017). W Polsce, Lepiarczyk i in. (2013) w doświadczeniu z siarką stosowaną w formie siarczanu amonu, uzyskali bardzo duże plony (13,6 z siarką vs. 11,7 t ha⁻¹ bez siarki). Produktywność brutto N w tym przykładzie wyniosła odpowiednio 85 i 73 kg ziarna kg⁻¹ N. W doświadczeniach własnych w warunkach deszczowania produktywność jednostkowa azotu kształtowała się, jak 85; 68,1 i 81,1 kg ziarna kg⁻¹ N nawozowego, odpowiednio dla NPK, NPK-S0 i NPK-CaS. Natomiast w doświadczeniu nienawadnianym produktywność azotu wyniosła, odpowiednio 58,9; 40,5 i 67,5 kg ziarna kg⁻¹ N. Porównanie obu grup tych wyników jednoznacznie wskazuje na siarczan wapnia jako korzystną formę siarki, zwłaszcza w naturalnych warunkach opadowych.

Kolejnym aspektem rozważań jest stopień realizacji potencjału produkcyjnego kukurydzy. Na obiekcie nienawadnianym plony wzorca odmianowego nie zostały przekroczone dla każdego z testowanych wariantów z siarką. Różnice te były duże w każdym z lat badań (tab. 5.1). W dodatku plony maksymalne z pewnymi wyjątkami, jak dla NPK-CaS w 2020 i 2021, wymagały bardzo dużych dawek azotu. Na obiekcie nawadnianym plony na poziomie wzorca odmianowego uzyskano tylko w 2022 roku i to niezależnie od systemu nawożenia siarką. W 2020 maksymalny plon, stanowiący 97% wzorca odmianowego uzyskano w wariacie NPK-S0. W 2021 różnica ta była dużo większa, gdyż maksymalny plon uzyskany w wariacie NPK-CaS stanowił tylko 85% wzorca odmianowego.

Tabela 5.1. Porównanie plonów doświadczalnych z danymi wzorcowymi i rzeczywistymi w Polsce, t ha⁻¹

Cecha	System S	2020	2021	2022
Wzorzec odmianowy	-	11,6	12,3	10,9
Plony - GUS	-	7,2	7,5	7,1
Obiekt nienawadniany	Średnia	6,7	7,8	7,9
- plony maksymalne	NPK	8,9/200 ¹	10,0/80	8,8/120
/dawka N	NPK-S0	7,5/200	8,7/160	8,8/200
	NPK-CaS	7,2/80	9,3/120	8,8/200
Obiekt nawadniany	Średnia	8,5	8,7	11,1
- plony maksymalne	NPK	9,5/120	9,7/80	13,1/160
/dawka N	NPK-S0	11,2/200	9,3/200	12,2/160
	NPK-CaS	9,7/160	10,5/160	12,1/80

¹ maksymalna dawka azotu dla maksymalnego plonu ziarna, kg N ha⁻¹. Źródło: opracowanie własne.

Ważnym celem prowadzonych badań było określenie plonotwórczego działania siarki na tle wzrastających dawek azotu. Z analizy tab. 5.1 wynika, że na obiekcie nienawadnianym, odnosząc się do plonu maksymalnego, nie odnotowano dodatkowej

reakcji na zastosowanie siarki. Natomiast na obiekcie nawadnianym działanie siarki ujawniło się dla obu form siarki w 2020 i dla siarczanu wapnia w 2021. Przyrost plonu wyniósł $0,9 \text{ t ha}^{-1}$. Jest to wartość zbliżona do tej jaką uzyskał *Swify i in.* (2022) stosując 150 kg N ha^{-1} w formie mocznika i $42,5 \text{ kg S ha}^{-1}$ w formie siarczanu wapnia ($9,75 \rightarrow 10,77 \text{ t ha}^{-1}$). Reakcja kukurydzy na nawożenie siarką, jak wynika z dotychczasowych badań prowadzonych w świecie, ujawnia się sporadycznie. W 11 doświadczeniach z nawadnianiem prowadzonych w stanie Nebraska (USA) stosując 224 kg N ha^{-1} , nie stwierdzono wzrostu plonu (*Wortmann i in.*, 2009). Przyrost plonu w następstwie stosowania siarczanu amonu w kukurydzy w stanach Północna Dakota i Minnesota (USA) odnotowano tylko w dwóch z 10 doświadczeń (*Kaur i in.*, 2019). W badaniach prowadzonych w stanie Kansas (USA) wzrost plonu odnotowano tylko w jednym z pięciu doświadczeń, stosując tiosiarczan amonu (*Husa i Ruiz Diaz*, 2021).

Czynnikiem różnicującym działanie siarki w doświadczeniu własnym była nie tylko forma siarki, lecz także warunki wodne. Na obiekcie nienawadnianym, a więc w naturalnych warunkach wodnych w sezonie wegetacyjnym, różnice w plonach w stosunku do wariantu klasycznego, czyli NPK, były zmienne, zależnie od dawki azotu. Zastosowanie siarczanu wapnia ($\text{CaSO}_4 \times 2\text{H}_2\text{O}$) zwiększyło plony głównie w zakresie małych dawek składnika. Różnica w plonie ziarna na kontroli N wyniosła $+1,15 \text{ t ha}^{-1}$ i zmniejszała się ze wzrostem dawki azotu, osiągając stan równowagi na kombinacji 80 kg N ha^{-1} . Uzyskany przyrost plonu wynikał prawdopodobnie z uwalniania z siarczanu wapnia dwóch składników, a mianowicie wapnia i siarki. Należy w tym miejscu podkreślić, że gleba w badanym stanowisku była uboga w oba te składniki pokarmowe (tab. 2.3). Analogiczny trend reakcji na zastosowanie siarczanu wapnia uzyskali *Potarzycki i Wendel* (2023), a rośliną testową były ziemniaki. Jednocześnie w tym samym zakresie dawek azotu stwierdzono istotną redukcję plonu ziarna na obiekcie z S^0 . Odnotowane zjawisko, a także wyniki badań cytowanych powyżej autorów, sugeruje, że czynnikiem sprawczym wzrostu plonu w warunkach naturalnej produkcji kukurydzy prawdopodobnie nie była siarka, lecz wapń.

W naturalnych warunkach opadowych stwierdzono istotny wzrost liczby i masy 1000 ziarniaków w warunkach niskiego zaopatrzenia kukurydzy w azot, lecz jednocześnie nawożonej siarczanem wapnia. Działanie plonotwórcze wapnia wynikało prawdopodobnie ze stymulacji wzrostu korzeni (*White and Broadley*, 2003). Wzrost wielkości systemu korzeniowego kukurydzy w naturalnych warunkach produkcji roślinnej, a więc w glebie o zmiennym uwilgotnieniu może prowadzić do zwiększonego

pobierania azotu (*Peng i in., 2010; Asibi i in., 2019*). Hipoteza ta została potwierdzona w przeprowadzonych badaniach, gdyż na kontroli azotowej, rośliny na obiekcie NPK-CaS zakumulowały 34 kg N ha⁻¹ (17,1%) więcej składnika w porównaniu do NPK. Różnica w plonie ziarna wyniosła natomiast 1,153 t ha⁻¹ (18,9%) na korzyść obiektu z siarczanem wapnia. Siarka w formie S⁰ na obu obiektach, zwłaszcza nienawadnianym, zredukowała masę azotu pobraną przez kukurydzę w szerokim zakresie dawek (nienawadniany do kombinacji z 200 a nawadniany do 160 kg N ha⁻¹).

Tak spektakularnego efektu działania obu testowanych nośników siarki nie odnotowano na obiekcie nawadnianym, na którym plony ziarna aż do dawki 80 kg N ha⁻¹ nie wykazały udowodnionych różnic między wariantami z siarką. W systemie bez siarki, czyli na NPK, jak i z siarką siarczanową (NPK-CaS), rośliny wykazały ten sam, klasyczny (funkcja kwadratowa) model plonotwórczej reakcji na wzrastające dawki azotu. W obu wariantach synergistyczny efekt współdziałania N i S w tej formie *wygasł* po zastosowaniu 80 kg N ha⁻¹. Stan ten przejawiał się spadkiem plonu ziarna na kombinacjach nawożonych większymi dawkami azotu. Jednocześnie dopiero po przekroczeniu tej dawki ujawnił się netto *efekt* S⁰, który na obiekcie nienawadnianym stwierdzono na kombinacji 200 kg N ha⁻¹.

W naukach o żywieniu roślin funkcjonuje pogląd, że efekt współdziałania azotu z siarką zależy nie tyle od ilości dostępnej siarki w glebie, lecz od ilości dostępnego azotu w środowisku wzrostu rośliny (*Jamal i in., 2010*). Ten fizjologiczny warunek działania siarki może więc tłumaczyć brak reakcji plonotwórczej kukurydzy na zastosowanie siarczanu wapnia na kombinacjach z dużymi, jak dla kukurydzy, dawkami azotu. Takie wyjaśnienie omawianego zjawiska jest wysoce prawdopodobne. Uzyskane wyniki pozwalają też na pośrednią ocenę roli S⁰ w gospodarce azotem w kukurydzy. W warunkach naturalnych produkcji, w których kluczowym czynnikiem ograniczającym dostępność składników pokarmowych jest woda, równowaga między dawkami azotu, a dawką siarki została uzyskana dopiero na kombinacji z 200 kg N ha⁻¹. Z analizy krzywej plonu wynika, że synergia działania obu tych składników pokarmowych na obiekcie nawadnianym w wariantcie nawozowym z siarczanem wapnia, niezależnie od warunków wodnych, uległa *wyczerpaniu* po przekroczeniu dawki 120 kg N ha⁻¹. Natomiast działanie S⁰ na obiekcie nawadnianym uległo natomiast wzmocnieniu po przekroczeniu tej dawki. Stan ten skutkowało większym pobraniem azotu, a w konsekwencji większym plonem ziarna. Wynik ten potwierdza najnowsze wyniki badań na współdziałaniem N i S w kukurydzy (*Husa i Ruiz Diaz, 2020*).

5.1.2. Struktura plonu ziarna

Plon ziarna kukurydzy, rozważany w kontekście fizjologii plonowania roślin nasiennych, jest funkcją stopnia wykształcenia dwóch podstawowych składowych, to znaczy liczby ziarniaków na jednostce powierzchni, czyli gęstości ziarniaków (gęstość ziarniaków, sztuki m⁻², LZ) i masy ziarniaka, traktowanej jako masa 1000 ziarniaków (MTZ) (Maddoni i in., 1998; Otegui i Bonhomme, 1998). Aktywny okres formowania struktury kolby kukurydzy obejmuje przedział od dwóch tygodni przed do dwóch tygodni po kwitnieniu (Borras i Vitantiano-Mazzini, 2018). Pierwsza składowa jest w istocie rzeczą cechą zagregowaną, obejmującą składowe pierwotne, takie jak obsada, to znaczy liczba kolb na jednostce powierzchni (OB), liczba rzędów w kolbie (R) oraz liczba ziarniaków w rzędzie (LZR). Te dwie ostatnie cechy określają liczbę ziarniaków w kolbie (LZK). Przeprowadzone badania wykazały, że bezpośrednim determinantem plonu ziarna na obiekcie nienawadnianym była LZK, aczkolwiek taki sam poziom zależności odnotowano dla LZ, a na nawadnianym LZ i MTZ. Należy podkreślić, że zmienność MTZ na obiekcie nawadnianym w 82% wyjaśniła zmienność plonu ziarna, a LZ tylko 17%. Zatem otrzymane wyniki wskazują na dominującą rolę LZ w kształtowaniu plonu ziarna kukurydzy. Gęstość ziarniaków na obiekcie o naturalnych opadach wyniosła średnio 2611±148, a na nawadnianym była o 10% większa, wynosząc 2874±164 sztuki m⁻². Różnica w MTZ była dużo mniejsza, gdyż wyniosła tylko 4,4% na korzyść obiektu nawadnianego. Relacje między LZ, a MTZ, zgodnie z ogólnie funkcjonującą regułą, mają charakter konkurencyjny, czyli wzrost LZ prowadzi do spadku MTZ i odwrotnie (Maddoni i in. 1998). W prowadzonych badaniach MTZ przekraczała generalnie 300 g, a więc była duża, lecz jednocześnie LZ mała (< 3000 sztuk m⁻²). Z tego też powodu nie ujawniła się konkurencja między tymi cechami. W warunkach braku fizjologicznego antagonizmu między LZ a MTZ plon wzrasta głównie w następstwie wzrostu masy ziarniaka (Maddoni i in. 1998).

Należy mieć na uwadze jeszcze jeden, lecz kluczowy fakt, a mianowicie to że rośliny dobrze odżywione azotem w okresie przed wyrzuceniem wiechy są bardziej odporne na niedobór wody i azotu w fazie kwitnienia (D'Andrea i in., 2008). Dobre odżywienie azotem prowadzi do zawiązania większej liczby ziarniaków w kolbie, a także zwiększa intensywność remobilizacji azotu z części wegetatywnych do ziarniaków w fazie nalewania ziarna, co przekłada się na większą masę ziarniaka (De Bruin i in., 2018; Nasielski i in., 2019). Masa ziarniaków w kukurydzy uprawianej w warunkach nawadniania wyraźnie reagowała na współdziałanie systemów nawożenia

siarką i dawek azotu. MTZ na obiekcie NPK-CaS przekraczała wartości uzyskane na NPK aż do dawki 136 kg N ha⁻¹. Przewaga NPK-S0 nad NPK ujawniła się dopiero po przekroczeniu dawki 160 kg N ha⁻¹. Natomiast na obiekcie nienawadnianym masa ziarniaków na NPK-CaS dominowała w stosunku do NPK w zakresie dawek 0-160 kg N ha⁻¹. Plonotwórczy efekt nawadniania kukurydzy, jak wykazały badania chińskie, istotnie zależy od gatunku gleby. Generalnie stwierdzono wzrost plonu ziarna wraz ze wzrostem kategorii ciężkości gleby. Różnica w plonach ziarna uzyskanych w stanowisku na glebie gliniastej a na piaszczystej wynosiła prawie 4 t ha⁻¹. należy podkreślić, że plony na glebie piaszczystej a do tego nawadnianej wyniosły 9,5 t ha⁻¹ (Fang i Su, 2019). Autorzy tego artykułu wykazali ścisły związek między masą korzeni a plonem ziarna. Otrzymany wzrost plonu wynikał analogicznie, jak w badaniach własnych, głównie z większej MTZ. Odnotowana w badaniach własnych reakcja MTZ na nawożenie kukurydzy siarką potwierdza pogląd, że plonotwórcze działanie tego składnika pokarmowego, ujawniające się w pierwszym okresie wegetacji kukurydzy, przekłada się na procesy formowania plonu w fazie nalewania ziarna (Mahal i in., 2022). Badania nad wpływem współdziałania N i S prowadzone przez Lepiarczyka i in. (2013) wykazały, że nawożenie kukurydzy nawozem azotowym z siarką (26% N i 13% S) w dawce 160 kg N ha⁻¹ pozwoliło uzyskać średnio 13,6 t ha⁻¹ ziarna. W stosunku do takiej samej dawki azotu, lecz bez siarki plon był mniejszy o prawie 14,3%. Różnica w plonie wynikała głównie z większej MTZ i nieznacznie większej liczby ziarniaków w kolbie.

Biomasa kukurydzy w stadium dojrzałości fizjologicznej jest silnie skorelowana z plonem ziarna, a więc jest najlepszym, lecz tylko po-zbiorowym, wskaźnikiem plonu (Djaman i in., 2013). Przeprowadzone badania, niezależnie od wariantu wodnego, w pełni potwierdziły tę zależność, gdyż zmienność biomasy kukurydzy w stadium BBCh 89 wyjaśniała w ²/₃ zmienności plonu ziarna ($r = 0,64, 0,68$, odpowiednio dla doświadczenia nienawadnianego i nawadnianego). Biomasa kukurydzy była wyraźnie mniejsza na obiekcie nienawadnianym, lecz tylko w warunkach naturalnego opadu wzrastała w reakcji na nawożenie siarczanem wapnia a w obu doświadczeniach jednocześnie wzrastała w reakcji na dawki azotu.

Istotnym elementem rozważań nad plonotwórczą rolą czynników naturalnych w kształtowaniu plonu ziarna jest więc rozdział biomasy w stadium dojrzałości fizjologicznej kukurydzy między ziarno a masę wegetatywną rośliny (słoma i resztki poźniwne). Prostym, lecz jednocześnie jednoznacznym wskaźnikiem, określającym te

złożone procesy, jest indeks żniwny (IŻ, ang. harvest index, HI) (*Hütsch i Schubert, 2017*). Wartość tego indeksu w latach 1983 – 2020 zwiększyła się z 50% do 57%. Odnotowany wzrost wynikał głównie z postępu hodowlanego (*Ruiz i in., 2023*). Indeks żniwny w warunkach prowadzonych badań wykazał dużą zmienność, głównie od warunków pogodowych w sezonie wegetacyjnym. Jest to zgodne z wynikami wielu doświadczeń, w których indeks ten w większym stopniu wykazuje zmienność w latach, niż w wyniku działania czynników agrotechnicznych, w tym nawadniania (*Zhang i in., 2004*). Dominuje także pogląd, że IŻ w warunkach naturalnych jest mniejszy, niż w warunkach pełnego nawadniania. Jak podaje *Djaman i in. (2013)*, w warunkach incydentalnego nawadniania wartości indeksu osiągnęły 50%, a przy pełnym nawadnianiu zwiększyły się do 57%. Wyniki własne wykazały, że na obiekcie nienawadnianym, a więc w naturalnych warunkach opadowych, tylko w 2022 uzyskano wartość IŻ powyżej 50, ściślej 57%. W pozostałych latach wartości indeksu były znacznie mniejsze. Na obiekcie nawadnianym wartości wskaźnika kształtowały się na poziomie mniejszym od 40%, wynosząc średnio $39 \pm 2\%$. Nawożenie siarką, zwłaszcza w warunkach naturalnych zmniejszało, aczkolwiek nieznacznie, natomiast nawożenie azotem, aczkolwiek nieznacznie, zwiększało wartość indeksu żniwnego kukurydzy.

5.1.3. Ziarno – zawartość składników pokarmowych

Ziarno to nie tylko fizyczna masa – plon, lecz także wartość pokarmowa a jednym z podstawowych kryterium oceny jakościowej jest zawartość składników pokarmowych (*Benton Jones, 2003*). Czynniki środowiskowe i doświadczalne istotnie kształtują dynamikę pobierania i zawartość, a w konsekwencji akumulację składników pokarmowych przez kukurydzę. Potwierdzają to liczne badania, w tym najnowsze (*Singh i in., 2023*). Najczęściej w tym zakresie oceny oznacza się zawartość białka, a nawet skład jakościowy białek (*Szulc i in., 2013*). W niniejszym opracowaniu uwzględniono dwa kryteria oceny:

- 1) zawartość składnika w stosunku do zakresu optymalnego (zał. 5.1);
- 2) zawartość składników w reakcji na nawożenie siarką.

Według pierwszego kryterium, optymalna zawartość azotu w ziarnie kukurydzy mieści się w szerokim zakresie $10\text{-}25 \text{ g kg}^{-1} \text{ s.m.}$ (*Benton Jones, 2003*). Wymagania w tym zakresie zostały spełnione i to niezależnie od warunków wodnych prowadzenia doświadczeń. Badania chińskie wykazały, że zawartość N w ziarnie nie miała związku z dawką wody, lecz generalnie była większa na glebie gliniastej niż piaszczystej ($14,6 \rightarrow$

15,6 g kg⁻¹ s.m.). Redukcja dawki wody prowadziła do wzrostu zawartości N w słomie (Fang i Su, 2019). W doświadczeniu własnym nawadnianie doprowadziło do prawie 2-krotnego spadku zawartości N w słomie. Stan ten wskazuje na pęd kukurydzy jako główne źródło azotu dla ziarniaków kukurydzy. Wzrost dawek N prowadził, niezależnie od warunków wodnych, do progresywnego wzrostu zawartości zarówno w ziarnie, jak i w słomie. Stan ten w kontekście powyżej obserwacji i wniosku wskazuje na niewykorzystanie przez roślinę azotu zawartego w pędzie zarówno do formowania plonu ziarna (LZ, MTZ), jak i akumulacji składnika w ziarnie.

Kukurydza reaguje silnym wzrostem plonu ziarna na dawki N, co prowadzi do ujawnienia się efektu rozcieńczenia (Guo i in., 2021). Mniejszą zawartość N odnotowano na obiekcie nawadnianym. Tym samym w pełni potwierdziło się wystąpienie tego zjawiska. Największą różnicę między doświadczeniami odnotowano nie w 2022, a więc w sezonie z największymi plonami (-2,1 g kg⁻¹ s.m.), lecz w 2021 z najmniejszymi plonami ziarna (-3,1 g kg⁻¹ s.m.). Zatem zaobserwowane zjawisko pośrednio wskazuje na niedobór N na obiekcie nawadnianym zarówno w okresie wzrostu wegetatywnego, jak i reprodukcyjnego kukurydzy. Przyczyną spadku zawartości N w ziarnie roślin nawadnianych mogła także być duża masa wegetatywna, która ograniczyła remobilizację składnika do ziarniaków. Nadmiar azotu w liściach kukurydzy po kwitnieniu, wydłuża okres aktywności fotosyntetycznej, lecz jednocześnie spowalnia remobilizację składnika (Fernandez i in., 2021). Badania własne wykazały, jak omówiono w części 5.1.2, wzrost MTZ, co skutkowało spadkiem zawartości N w ziarniakach.

Działanie siarki w każdym roku, lecz głównie na obiekcie nienawadnianym było pozytywne, prowadząc do wzrostu plonu i zawartości a. W 2022 plon ziarna zwiększył się wyniku zastosowano siarczanu wapnia o 4,1% a zawartość białka (N × 6,25) o 6%. W rezultacie plon białka zwiększył się o 10,4%. Badania Filipek-Mazur i in. (2013) wykazały, że nawożenie kukurydzy nawozem azotowym, zawierającym także siarkę, zwiększyło zawartość siarki w ziarnie. Odnotowano jednakże, że stosowanie siarki w formie siarczanu amonu nieznacznie zredukowało zawartość azotu w ziarnie, a tym samym wyraźnie zmniejszyło masę składnika w ziarnie.

Pierwiastkiem, który reaguje spadkiem zawartości w warunkach wzrostu plonu, niezależnie od stanu odżywienia azotem, jest magnez (Guo i in., 2021). Hipoteza ta nie została w pełni potwierdzona w badaniach własnych. Efekt rozcieńczenia ujawnił się tylko w 2020, gdyż przy plonach, średnio o 1,8 t ha⁻¹ większym na obiekcie

nawadnianym, zawartość magnezu zmniejszyła się o prawie 19%. W pozostałych latach, zwłaszcza w 2022, w którym plony były większe o 3,1 t ha⁻¹ zaobserwowano zjawisko odwrotne, aczkolwiek zawartość Mg była dużo mniejsza, niż w 2020. Działanie siarki, aczkolwiek małe, niezależnie od obiektu, ujawniło się w 2020 i 2022.

Zjawisko rozcieńczenia składników pokarmowych w ziarnie notuje się najczęściej do mikroskładników (*Fan i in., 2008*). Efekt rozcieńczenia dla miedzi, a zwłaszcza dla żelaza ujawnił się w 2022. Natomiast dla manganu i cynku został odnotowany w 2020 i 2022 (*Benton Jones, 2003; Simic i in., 2009*). Wzrastające dawki azotu nie miały wpływu na zawartość żelaza, manganu, cynku i miedzi na obiekcie nienawadnianym, aczkolwiek ujawnił niewielki i pozytywny trend. Na obiekcie nawadnianym trend ten, za wyjątkiem żelaza, został potwierdzony. Podobne zjawisko odnotował *Losak i in. (2011)*, lecz plony ziarna prezentowane przez autorów tego artykułu kształtowały się średnio na poziomie 14 t ha⁻¹. W doświadczeniu własnym zastosowanie siarki na obiekcie nienawadnianym pogłębiło ten i tak niekorzystny status, zwłaszcza dla żelaza (zał. 5.1). W odniesieniu do cynku wpływ siarki był dodatni, lecz zmienny w latach. Zawartość tych czterech pierwiastków w ziarnie kukurydzy była ekstremalnie mała, przyjmując za kryterium wymagania paszowe (*NRC 2001*).

Zawartość fosforu, za wyjątkiem 2021 na obiekcie nawadnianym, nie spełniała norm żywieniowych (*NRC, 2001*). Nie odnotowano jednakże efektu rozcieńczenia. Natomiast zawartość K i Ca była zdecydowanie większa na obiekcie nawadnianym, co pośrednio wskazuje na lepsze zaopatrzenie roślin w ten składnik w warunkach poprawy warunków wodnych pobierania tych składników z gleby (*Novak i Vidovic, 2003*). O ile zawartość K spełniała normy żywieniowe (0,44% s.m.) na obu obiektach w 2022, tak zawartość Ca była ekstremalnie mała (300 mg kg⁻¹ s.m.). Natomiast zawartość sodu, dla którego efekt rozcieńczenia ujawnił się tylko w 2022, nie spełniała norm żywieniowych (100 mg kg⁻¹ s.m.) w tym właśnie roku na obu obiektach, a w pozostałych latach na obiekcie nienawadnianym. Działanie systemów nawożenia siarką odnotowano głównie dla wapnia. Na obiekcie nienawadnianym zastosowanie siarki zwiększało zawartość tego pierwiastka. Natomiast na nawadnianym zwiększało w 2020 a zmniejszało w pozostałych latach, w których zawartość składnika była największa. Wpływ stosowania siarki na zawartość sodu był zmienny w latach.

5.2. Ocena stanu odżywienia kukurydzy w krytycznych stadiach formowania plonu

Kukurydza jest rośliną o bardzo zróżnicowanej długości wegetacji, bardzo dużej dynamice wzrostu, dużym potencjale plonowania. Z tej też przyczyny jest uprawiana w określonej obsadzie, którą wynika z potencjału siedliska do zaopatrzenia rośliny w wodę i składniki pokarmowe w krytycznych stadiach (fazach) wegetacji (*Benton Jones Jr., 2003*). Ocena stanu odżywienia rośliny w ściśle określonych, krytycznych stadiach formowania plonu, jest niezbędna do:

- 1) korekty stanu odżywienia;
- 2) prognozy plonu ziarna;
- 3) prognozy biomasy (kukurydza kiszonkowa),
- 4) prognozy zawartości składników pokarmowych, głównie azotu.

W przeprowadzonych badaniach ocenę stanu odżywienia kukurydzy przeprowadzono w dwóch stadiach:

- 1) 4-tego liścia (BBCH 14);
- 2) początku kwitnienia (BBCH 61/62).

W diagnostyce stanu odżywienia roślin uprawnych kluczowym kryterium prognozy plonu jest zawartość składnika(-ów) pokarmowego(-ych) w częściach wskaźnikowych. Takie podejście wynika z faktu, że współcześnie uprawiane odmiany różnią się znacznie pod względem szeregu cech morfologicznych i potencjału plonowania od tych uprawianych pod koniec XX wieku, dla których opracowano zakresy optymalne (*Schulte i Kelling, 1991; Benton Jones, 2003; Ciampitti i Vyn, 2013; Ruiz i in., 2023*). W rozdziale 5.1 wykazano, że reakcja kukurydzy na siarkę była zmienna w latach, potwierdzając tym samym wyniki innych badań prowadzonych w tym zakresie w różnych obszarach geograficznych świata.

5.2.1. Stadium 4-tego liścia

W kukurydzy pierwotny etap formowania plonu ziarna ujawnia się już w stadium BBCH 14. W tym stadium rozwoju kukurydzy ustala się pierwotna struktura morfologiczna rośliny, co ma istotne znaczenie dla plonu (*Lejeune i Bernier, 1996; Gonzalez i in., 2019*). W tym pierwszym etapie oceniono wartość predykcijną biomasy kukurydzy w stadium BBCH 14, zarówno świeżej, jak i suchej dla plonu ziarna i biomasy całkowitej (BC) kukurydzy w stadium dojrzałości fizjologicznej. Otrzymane zależności były istotnie większe (kryterium: współczynnik determinacji, R^2) dla:

- 1) świeżej niż suchej masy kukurydzy, jako cechy diagnostycznej;
- 2) biomasy całkowitej (BC), niż plonu ziarna (PLZ);
- 3) obu cech wymienionych w punktach 1 i 2 na obiekcie nawadnianym.

Większa siła związku korelacyjnego biomasy kukurydzy w stadium BBCH 14 z BC niż PLZ wynika z silnego związku z masą łodyg w stadium BBCH 89. Nie stwierdzono natomiast istotności związku korelacyjnego omawianej cechy z wartościami indeksu żniwnego. Uzyskane wyniki potwierdzają znaczącą rolę procesów formowania struktury plonu kukurydzy we wczesnych stadiach wegetacji dla plonu ziarna (*Gonzalez i in., 2019*)

W stadium BBCH 14, analizuje się całe rośliny (*Benton Jones, 2003*). Kryterium oceny na tym etapie diagnostyki odżywienia są zakresy krytyczne dla określonego stadium rozwoju rośliny. Na tym etapie analizy posłużono się zakresami opublikowanymi aktualnie w USA (*Amissach i in. 2023*). W pierwszej kolejności uwzględniono składniki, które warunkowały plon ziarna (tab. 5.2). Z analizy regresji krokowej wynika, że w omawianym stadium krytycznymi składnikami pokarmowymi ograniczającymi plon ziarna kukurydzy w naturalnych warunkach wodnych produkcji były N i Mg. Wartość współczynnika korelacji dla azotu była dodatnia, lecz słaba. Jednakże to właśnie N, a także Cu i Fe były jedynymi z dziesięciu badanych pierwiastków, których zawartość w kukurydzy w stadium BBCH 14, mieściła się w zakresie optymalnym i to w każdym roku badań, niezależnie od warunków wodnych w okresie wegetacji (zał. 5.2). Między N i Cu nie zanotowano istotnej korelacji, aczkolwiek takie współdziałanie jest fizjologicznie uzasadnione i zostało potwierdzone, przykładowo dla pszenicy (*Kumar i in., 1990*). Brak statystycznej współzależności prawdopodobnie wynikał z faktu, że przy największych dawkach azotu notowano istotny spadek zawartości Cu w roślinie. Nie stwierdzono reakcji azotu na działanie systemów nawożenia siarką, co wskazuje na równowagę między N i S w tym stadium rozwoju kukurydzy (*Pagani i in., 2012*).

Zawartość magnezu w kukurydzy w stadium BBCH 14 mieściła się na pograniczu dolnego zakresu lub była w niedoborze (zał. 5.2). Otrzymane wartości mieściły się natomiast w zakresie odnotowanym dla innych doświadczeń prowadzonych w tym stadium w Polsce (*Szczepaniak i in., 2014; Szulc i in., 2021*). Zawartość magnezu wykazała istotną, dodatnią reakcję na nawożenie siarką na obiekcie nienawadnianym w 2021 i 2022. Ujemną korelację z plonem należy traktować nie jako czynnik redukujący plon ziarna, lecz jako sygnał nieefektywnego wykorzystania tego składnika przez

rosnąca roślinę (*Grzebisz i in., 2013*). Składnik ten był ujemnie skorelowany z zawartością Cu. Co tym samym sugeruje pogłębienie nieefektywności fizjologicznej magnezu w warunkach dobrego zaopatrzenia roślin w miedź.

Tabela 5.2. Składniki pokarmowe istotnie warunkujące plon ziarna – predykcja plonu

Faza rozwoju kukurydzy	Nienawadniane	R ² , p ≤	Nawadniane	R ² , p ≤
Stadium 5-tego liścia	N (+), Mg (-)	0,36; 0,01	K (+)	0,39; 0,001
Liść podkolbowy, początek kwitnienia	Ca (-)	0,16; 0,01	Ca (+)	0,46; 0,001
Łodyga, początek kwitnienia	Mn (+)	0,33; 0,001	N (+), Cu (+)	0,56; 0,001

+, - – odpowiednio, dodatni i ujemny związek korelacyjny z plonem. Źródło: opracowanie własne.

W warunkach nawadniania, głównym determinantem plonu ziarna w stadium BBCH 14 okazał się potas (tab. 5.2). Niedobór tego składnika stwierdzono w każdym roku badań. Stan ten wystąpił, pomimo zastosowania odpowiednich dawek K przed siewem kukurydzy, a także dostatecznej zasobności gleby w ten składnik (tab. 2.1). Potas, jak wielokrotnie potwierdzono, jest tym składnikiem pokarmowym, który kukurydza pobiera w dużej ilości, często większej niż masa pobranego azotu (*Grzebisz i in., 2010a, Grzebisz i in., 2010b; Ciampitti i Vyn, 2013*). Zastosowanie siarki, lecz tylko w 2022, a więc roku z największym plonem ziarna, pogłębiło niedobór K w roślinie. Zawartość K wykazała dodatni i silny związek korelacyjny z Fe ($r = 0,80^{***}$), a także dodatni, lecz słabszy z Ca ($0,59^{***}$). Wzrost zawartości Fe następował aż do zawartości K, wynoszącej 35 g kg⁻¹ s.m.. Taki poziom zawartości K wystąpił tylko w 2022, a więc w roku z największym plonem ziarna

Wpływ stosowania siarki na zawartość pozostałych analizowanych pierwiastków, względnie słabo skorelowanych z głównymi determinantami plonu, w znacznym stopniu był związany z warunkami wodnymi prowadzenia doświadczeń (zał. 5.2). Zawartość fosforu tylko w 2021 mieściła się w normie. Zawartość wapnia na obiekcie niedeszczowanym była niska lub ekstremalnie niska. Natomiast na obiekcie deszczowanym bardzo niskie wartości odnotowano tylko w 2021. Wpływ zastosowania siarki zasadniczo pogłębiał niedobór wapnia w roślinie. Z grupy analizowanych mikroelementów i to niezależnie od warunków wodnych, niedobór dotyczył tylko Zn. W pierwszych dwóch latach badań, nawożenie siarką generalnie zwiększało zawartość, zwłaszcza Zn i Fe. W 2022, a więc sezonie z największymi plonami ziarna siarka na

obiekcie nienawadnianym stymulowała zawartość Fe i Cu, lecz jednocześnie zmniejszała zawartość Mn (także na nawadnianym) i Zn.

5.2.2. Liść podkolbowy

Liść podkolbowy kukurydzy jest traktowany jako standardowy, diagnostyczny organ tej rośliny uprawnej (Jones i in. 1990; Campbell i Plank, 2000). Dla tej części rośliny opracowano zakresy odżywienia (Schulte i Kelling, 1991). Liść podkolbowy jest także podstawą do diagnozy stanu odżywienia tej rośliny metodą DRIS (The Diagnosis and Recommendation Integrated System) (Soltanpour i in., 1995; Szczepaniak i in., 2014).

Riedell (2010) stwierdził, że azot jako kluczowy składnik pokarmowy, zwiększając masę kukurydzy w okresie jej wegetatywnego wzrostu, prowadzi do spadku (rozcieńczenia) lub do wzrostu zawartości danego składnika pokarmowego. Analizując te zależności w badaniach własnych odnotowano istotny i specyficzny związek między zawartością azotu w liściu podkolbowym (BLP) a masą tego organu kukurydzy. Niezależnie od warunków wodnych zależność tą najlepiej opisuje funkcja kwadratowa:

1. Doświadczenie nienawadniane

$$N = -398BLP^2 + 316BLP - 24,7 \text{ dla } n = 54, R^2 = 0,72, p \leq 0,01$$

2. Doświadczenie nawadniane

$$N = 134BLP^2 + 122BPL + 10,8 \text{ dla } n = 54, R^2 = 0,65, p \leq 0,01$$

Uzyskanie równia 2-go stopnia sygnalizuje, że zawartość N w liściu podkolbowym osiągnęła stan wysycenia. Zawartość składnika wzrastała progresywnie, osiągając maksymalnie 38,0 i 38,6 g kg⁻¹ s.m., odpowiednio dla obiektu nienawadnianego i nawadnianego. Masa liścia podkolbowego, warunkująca ten poziom zawartości azotu wyniosła odpowiednio 0,40 i 0,46 t ha⁻¹. Powyżej tych wartości, co ujawniło się w 2022, wystąpiło zjawisko rozcieńczenia azotu. Przyrost masy liścia podkolbowego przy mniejszej zawartości składnika, zwiększa tym samym udział tzw. N strukturalnego, co w konsekwencji przedłuża jego żywotność, a tym samym aktywność fotosyntetyczną (Fernandez i in., 2021). W naturalnych warunkach wodnych progresywny, silny wzrost zawartości składników pokarmowych, zgodny z trendem wzrostu masy liścia podkolbowego notowano dla S, K, Na (R² > 0,5) a słaby, a do tego regresywny dla P, Cu, Zn (R² < 0,5). Rośliny nawadniane wykazały analogiczne trendy dla P i Cu. Natomiast progresywny wzrost poza S, K, Na obejmował także Ca i Mg (tab. 5.3).

Z przeprowadzonej analizy regresji krokowej jednoznacznie wynika, że pierwiastkiem, niezależnie od warunków wodnych prowadzenia doświadczeń, krytycznym dla plonu ziarna był wapń (tab. 5.2). Na obiekcie nienawadnianym zależność ta była bardzo słaba (mała wartość R^2) a do tego ujemna, sugerująca nadmiar wapnia w liściu. Jest to niezgodne z faktami, gdyż zawartość wapnia w liściu podkolbowym roślin nienawadnianych w każdym roku badań kształtowała się na ekstremalnie niskim poziomie (zał. 5.4). Pozorna niezgodność wynika z tego, że w 2022 zawartość wapnia w liściu podkolbowym była najmniejsza w latach badań, a plon ziarna był największy. Zawartość wapnia była ujemnie, a do tego silnie skorelowana z zawartością potasu i cynku, a nieco słabiej z siarką. Pierwiastki te wywierały dodatni wpływ na plon ziarna. Można więc stwierdzić, że wzrost ich zawartości osłabiał ujemne działanie wapnia. Otrzymany stan odżywienia kukurydzy w stadium BBCH 61, a także związki korelacyjne z plonem wskazują na zaburzenia relacji między wapniem a tymi trzema pierwiastkami.

Na obiekcie nawadnianym plon ziarna istotnie i silnie zależał od zawartości wapnia w liściu podkolbowym. Znak dodatni tej zależności wskazuje na niedobór wapnia. Jest to zgodne z faktami, gdyż optymalny stan zawartości tego pierwiastka odnotowano tylko w 2022. Większe plony ziarna w 2022 między obiektami prowadzonym w różnych warunkach wodnych można wytłumaczyć właśnie różnicą w zawartości Ca w roślinie. Na obiekcie nienawadnianym wynosiła zaledwie $0,8 \text{ g kg}^{-1}$ s.m. podczas, gdy na nawadnianym była ponad sześciokrotnie większa, wynosząc $5,0 \text{ g kg}^{-1}$ s.m.. Według *Potarzyckiego* (2010) optymalny zakres zawartości Ca w liściu podkolbowym kukurydzy mieści się w przedziale $2,8\text{-}3,6 \text{ g kg}^{-1}$ s.m.. W badaniach *Szczepaniaka i in.*, (2014) zawartość Ca w tym organie kukurydzy w stadium BBCH 61 kształtowała się w zakresie $5,6\text{-}6,3 \text{ g kg}^{-1}$ s.m.. Dopiero przy takim poziomie zaopatrzenia kukurydzy w Ca, składnik ten nie stanowi czynnika ograniczającego plony ziarna kukurydzy.

Na obiekcie nawadnianym zawartość wapnia wykazała dodatnią korelację ze wszystkimi pierwiastkami, które dodatnio wpływały na plon (N, S, K, Na, Mg) a ujemną z tymi, które także były ujemnie skorelowane z plonem ziarna (P, Cu). Spośród tych składników szczególnej uwagi wymagają magnez, fosfor i miedź. Analiza stosunku Ca/Mg wykazała, że krytyczna zawartość magnezu stymulująca zawartość wapnia w liściu podkolbowym kukurydzy wynosiła $0,59 \text{ g kg}^{-1}$ s.m.. W warunkach glebowych Polski magnez jest jednym z krytycznych składników pokarmowych, warunkującym

wzrost i plony kukurydzy (Szulc i in., 2010). Zawartość fosforu wykazała silną, ujemną reakcję na wzrost zawartości wapnia w liściu podkolbowym. Na obiekcie nienawadnianym kształtowała się poniżej normy. Jednakże, spadek zawartości tego składnika do $1,47 \text{ g kg}^{-1}$ s.m., w następstwie wzrostu zawartości wapnia do $0,53 \text{ g kg}^{-1}$ s.m., nie spowodował spadku, lecz wzrost plonu ziarna. Powyższa zawartość fosforu wg Schulte i Kellinga (1991) oznacza deficyt składnika w roślinie, a więc powinna nastąpić redukcja plonu. Otrzymana prawidłowość kwestionuje zatem przydatność diagnostyczną zakresu normatywnego zawartości fosforu w liściu podkolbowym do diagnozy stanu odżywienia i prognozy plonu ziarna. Uzyskane wyniki potwierdzają pogląd, że w warunkach intensywnej produkcji fosfor zakumulowany w okresie wzrostu wegetatywnego rośliny nasiennej może być wykorzystany efektywnie tylko w warunkach dobrze wykształconej struktury plonu (liczba nasion/ziarniaków na jednostce powierzchni) (Grzebisz i in., 2024). Warunek ten nie został spełniony w prowadzonych doświadczeniach, gdyż gęstość ziarniaków, zwłaszcza na obiekcie nienawadnianym, była istotnym czynnikiem ograniczającym plon kukurydzy. W odniesieniu do miedzi okazało się, że ujemny związek zawartości tego składnika w liściu podkolbowym z zawartością wapnia ujawnił się na obiekcie nawadnianym jako klasyczny przykład antagonizmu (zależność liniowa; Ca vs. Cu $\rightarrow r = -0,83^{***}$).

Analiza przedstawionych zależności między zawartością składników pokarmowych w liściu podkolbowym pozwala na wysoce wiarygodną predykcję plonu, gdyż stwierdzony niedobór wapnia jest zgodny z wynikami analiz glebowych, które wykazały ekstremalnie niską zasobność gleby w ten składnik pokarmowy (tab. 2.1). Nie jest to więc zgodne z poglądem Kovács'a i Vyn (2017), którzy pomimo uzyskania zdecydowanie bardziej wiarygodnych zależności między zawartością N, P, S, Cu i Fe a plonem ziarna ($r \approx 0,46-0,89$), stwierdzili, że wartości te nie pozwalają na wiarygodną prognozę plonu ziarna. Autorzy tego artykułu sugerują konieczność rewizji dotychczasowych zaleceń nawozowych polegających na ocenie stanu odżywienia rośliny na podstawie analizy zawartości składników pokarmowych w liściu podkolbowym.

Oddzielnej analizie wymaga ocena roli siarki i wskaźnika N/S, który pośrednio określa wpływ stosowania siarki na efektywność azotu (Scherer, 2001). Przeprowadzone badania wykazały, że głównym determinantem zawartości siarki w kukurydzy, ściślej w liściu podkolbowym, jako części diagnostycznej rośliny, był sezon wegetacyjny. Tylko w 2022, zawartość tego pierwiastka przekroczyła dolny poziom

zakresu optymalnego, czyli 2,1 g kg⁻¹ s.m. (*Benton Jones, 2003*). Należy przy tym podkreślić, że nieznacznie większą zawartość tego pierwiastka notowano w roślinach na obiekcie nawadnianym (2,1 vs. 2,5 g kg⁻¹ s.m.). Zawartość siarki w liściu podkolbowym, niezależnie od warunków prowadzenia doświadczenia, była istotnie i silnie związana z zawartością kationów (K, Na, Mg). Siła tych związków (R²) była zdecydowanie większa na obiekcie nawadnianym. Dotyczy to zwłaszcza magnezu i wapnia, dla których związki te na obiekcie nienawadnianym były słabe, a nawet ujemne, jak w przypadku wapnia. Wy tłumaczeniem takiej relacji jest prawdopodobnie to, że w/w kationy uczestniczą w procesie pobierania jonów siarczanowych, a istotną rolę, zwłaszcza dla wapnia, odgrywają warunki wodne (*Watts i Dikc, 2014*).

Relacje między zawartością azotu w liściu podkolbowym a zawartością siarki były istotne i dodatnie, co tym samym potwierdza współdziałanie obu składników na podstawowym poziomie biologicznym rośliny (*Jamal et al., 2010*). Jednakże związki korelacyjne azotu z N/S były ujemne, lecz istotne tylko na obiekcie nienawadnianym. Taka relacja wskazuje na stan nierównowagi między azotem a siarką w naturalnych warunkach opadowych wzrostu kukurydzy. Istotny wpływ N/S na plon ziarna odnotowano tylko na obiekcie nawadnianym. Taki stan sugeruje, że na obiekcie nienawadnianym inne czynniki, niż stan odżywienia kukurydzy rośliny azotem i siarką były kluczowe dla plonu ziarna. Bardziej jednoznacznie kształtowała się natomiast relacja między S i N/S. Zawężenie tej relacji do poniżej 15:1, niezależnie od warunków wodnych prowadzenia doświadczeń, lecz bardziej widoczne na obiekcie nawadnianym, prowadziło do wzrostu plonu. Takie warunki wystąpiły jednak tylko w 2022.

5.2.3. Pęd

Pęd kukurydzy w stadium początku kwitnienia kukurydzy jest incydentalnie traktowany jako część wskaźnikowa, diagnostyczna stanu odżywienia tej rośliny (*Benton Jones, 2003*). Biomasa kukurydzy w stadium BBCH 61, zarówno świeża, jak i sucha, na obiekcie nienawadnianym nie wykazała istotnego związku z plonem, ziarna. Natomiast na obiekcie nawadnianym, obie te cechy wykazały istotny, a do tego dodatni wpływ na plon ziarna, co wynikało z bardzo dużej biomasy w 2022, a więc w roku z największym plonem ziarna.

Zawartość składników pokarmowych w pędzie kukurydzy w stadium BBCH 61 okazała się, biorąc za kryterium wartość R², bardziej wiarygodnym organem wskaźnikowym, niż liść podkolbowy (tab. 5.2). Wartości tego współczynnika były

większe niż dla liścia podkolbowego, co oznacza większą wartość predykcijną dla plonu ziarna. Na obiekcie nienawadnianym, jak wynika z przeprowadzonej analizy wariancji, składnikiem warunkującym plon był mangan. Zawartość tego pierwiastka mieściła się w zakresie optymalnym, za wyjątkiem 2020 (zał. 5.5). Zastosowanie siarki na obiekcie nienawadnianym, ujawniło się tylko w 2020 i 2021, obniżając zawartość manganu. Pierwiastek ten był istotnie i silnie skorelowany, za wyjątkiem żelaza, z pozostałymi pierwiastkami, a zwłaszcza z cynkiem i potasem. O ile zawartość cynku, za wyjątkiem 2020, mieściła się w zakresie optymalnym, tak zawartość potasu była bardzo mała, zwłaszcza w 2020. Stan obserwowany w pędzie ujawnił się już w stadium BBCH 14 (zał. 5.2). W dodatku wzrost zawartości manganu powyżej 63 mg kg⁻¹ s.m. zmniejszała zawartość K w pędzie kukurydzy. Analiza wpływu zawartości potasu na elementy struktury plonu wykazała, że pierwiastek ten istotnie kształtował liczbę ziarniaków w rzędzie kolby (LZR) oraz masę 1000 ziarniaków (MTZ). Uzyskane zależności przedstawiają się następująco:

$$1) \text{ LZR: } \quad LZR = 0,95K + 12,3 \text{ dla } n = 54, R^2 = 0,74 \text{ i } p \leq 0,74$$

$$2) \text{ MTZ: } \quad MTZ = 8,4K + 193,3 \text{ dla } n = 54, R^2 = 0,61 \text{ i } p \leq 0,61$$

Wzrost zawartości K z 10 do 20 g kg⁻¹ s.m. zwiększał LZR o 44% a MTZ o 30%. Zastosowanie siarki, zwłaszcza w 2022, obniżając zawartość Mn, zwiększało tym samym zawartość K w pędzie, co skutkowało wzrostem plonu. Niedobór K w prowadził do nieefektywnej gospodarki azotem, na co wskazuje reakcja liczba ziarniaków w kolbie w reakcji rozszerzający się stosunek N/K:

$$LZK = -126 \frac{N}{K} + 578 \text{ dla } n = 54, R^2 = 0,67 \text{ i } p \leq 0,001$$

Niedobór K na obiekcie nienawadnianym prowadził z jednej strony do redukcji potencjału plonotwórczego kukurydzy, którego istotnym elementem jest liczba ziarniaków w kolbie, a z drugiej strony redukował masę ziarniaka. Otrzymane zależności są w pełni zgodne z wynikami prezentowanymi przez *Szczepaniaka i in (2014)*, który wykazał, że K jest istotnym czynnikiem odpowiedzialnym za równowagę żywieniową w kukurydzy na początku kwitnienia.

Na obiekcie nawadnianym krytycznymi składnikami pokarmowymi dla predykcji plonu ziarna były azot i miedź (tab. 5.2). Zawartość pierwszego z tych dwóch pierwiastków mieściła się w zakresie normatywnym, podczas, gdy drastyczny niedobór miedzi wystąpił w 2020 (zał. 5.5). Zawartość azotu nie była lub była tylko słabo

związana z zawartością pozostałych składników pokarmowych. Natomiast zawartość miedzi, za wyjątkiem azotu i sodu, była istotnie skorelowana z zawartością pozostałych składników pokarmowych, zwłaszcza bardzo silnie z potasem i magnezem. Oba te składniki wykazały synergistyczny wpływ na zawartość miedzi. Pomimo niedoboru potasu w pędzie kukurydzy nie odnotowano wpływu stosunku N/K na elementy struktury plonu. W istocie rzeczy, realnym predykatorem plonu okazał się wapń, a otrzymana zależność przedstawia się jak:

$$PLZ = -0,000002Ca^2 + 0,0058Ca + 7,074 \text{ dla } n = 54, R^2 = 0,51 \text{ i } p \leq 0,05$$

Z otrzymanego równania wynika, że PLZ_{maks} , wynoszący $11,3 \text{ t ha}^{-1}$ uzyskano dla $Ca_{opt} = 1,5 \text{ g kg}^{-1} \text{ s.m.}$. Takie wartości dla tego pierwiastka notowano tylko w 2022. Siarka, zastosowana w nawozie, niezależnie od formy, redukując zawartość wapnia w pędzie kukurydzy zwiększała tym samym plon ziarna. Hipotetyczna rola siarki sprowadzała się prawdopodobnie do dwóch procesów w zależności od formy. Siarka elementarna, co wykazano, zmniejszała masę pobieranego azotu przez kukurydzę, a stan równowagi z tym składnikiem został osiągnięty dopiero na kombinacji z 200 kg N ha^{-1} . Po drugie siarka tworzy związki z wapniem, wyłączając ten składnik z obiegu (*Shainberg i in., 1989*).

5.2.4. SPAD jako wskaźnik diagnostyczny plonu

Wskaźnik zieloności liścia, SPAD, określając względną zawartość chlorofilu w liści, służy do pośredniej oceny stanu odżywienia roślin azotem (*Bavec i in., 2022*). Pomiar przeprowadzony w stadium BBCH 61 ma znacznie diagnostyczne dla prognozy plonu ziarna, biomasy kukurydzy, ewentualnie zawartości azotu w ziarnie kukurydzy (*Rostami i in., 2008*).

Na obu obiektach doświadczalnych wskaźnik SPAD wykazał przydatność diagnostyczną dla w/w cech kukurydzy. Na obiekcie nienawadnianym zależność z plonem ziarna była istotna, lecz słaba ($R^2 = 0,31$). Przyczyną niskiej wartości R^2 było zakłócenie stanu odżywienia roślin, które wystąpiło w 2021. Pomijając ten sezon, wartość R^2 zwiększyła się do 0,55. Na obiekcie nawadnianym predykcja plonu była zdecydowanie większa, gdyż dla całego okresu badań wartość R^2 wyniosła 0,56, a wykluczając 2021, osiągnęła 0,75. Warunki pogodowe, w tym warunki wodne w okresie wegetacji są zatem istotnym czynnikiem wartości predykcyjnej SPAD. Obie wartości R^2 można uznać za wysokie, gdyż przykładowo *Szulc i in. (2021)* wykazali

wartości znacznie mniejsze, a istotną zależność z plonem uzyskali tylko w dwóch z trzech lat badań.

W predykcji plonu, korzystając ze SPAD, istotnym jest uzyskanie odpowiedzi o zależność wskaźnika od zawartości azotu w organie diagnostycznym. Cechą liści kukurydzy zlokalizowanych wokół najwyższej położonej kolby jest większa koncentracja azotu, niż w pozostałych liściach, ulokowanych w dolnych i górnych partiach rośliny. Największą koncentrację składnika w kukurydzy uzyskują rośliny na dwa tygodnie przed i po kwitnieniu. Wartości indeksu SPAD są silnie skorelowane z zawartością chlorofilu w liściach i zawartością w nich azotu. Zależność ta jest przydatna do prognozy plonu tylko wtedy, gdy jej przebieg jest zgodny z funkcją kwadratową (Dwyer i in., 1991).

Analiza regresji krokowej na obiekcie nienawadnianym wykazała brak takiej zależności z powodu wyników uzyskanych w 2021. Wyłączając ten sezon z badań uzyskano istotną zależność SPAD od azotu ($R^2 = 0,64$, $p \leq 0,001$). W kolejnym kroku założono zależność wartości indeksu SPAD od ogólnego stanu odżywienia rośliny. Analizę regresji krokowej przeprowadzono w ujęciu dla trzech i dwóch sezonów. Uzyskane równania przedstawiają się następująco:

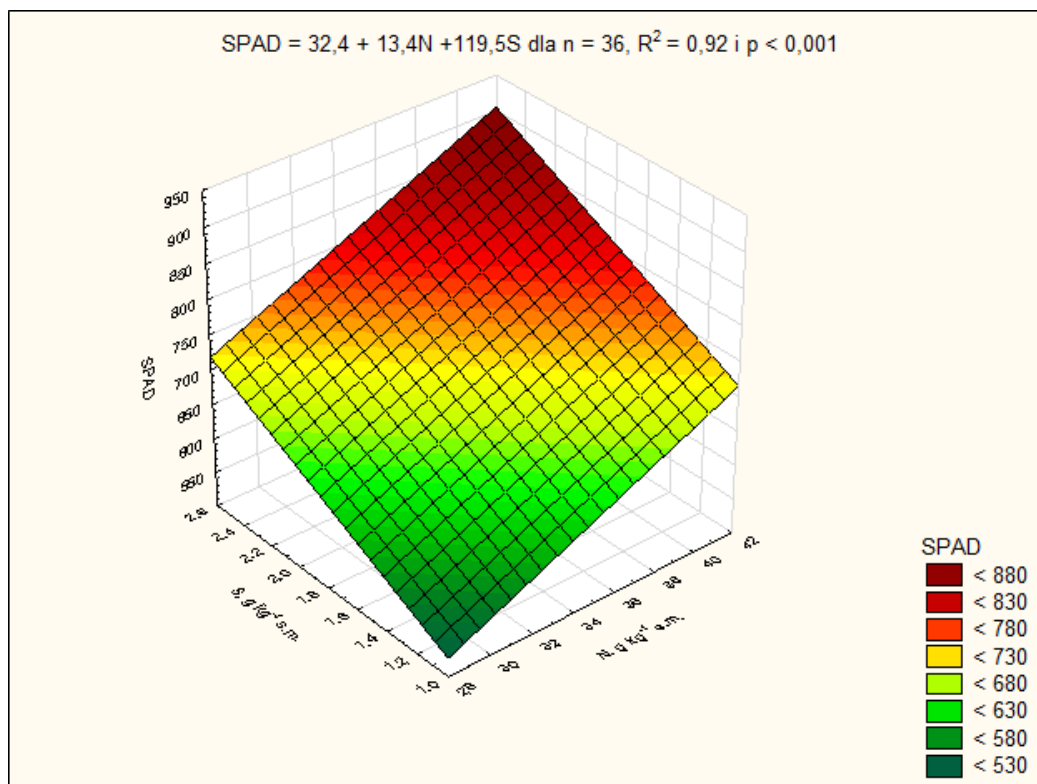
1) trzy sezony: 2020-2022:

$$SPAD = 395 + 129S - 0,032Ca + 27,3Cu \quad \text{dla } n = 54, R^2 = 0,72 \text{ i } p \leq 0,001$$

2) dwa sezony: 2020 i 2022:

$$SPAD = 32,4 + 13,4N + 119,5S \quad \text{dla } n = 36, R^2 = 0,92 \text{ i } p \leq 0,001$$

Drugie z powyższych równań, uwzględniające tylko dwa pierwiastki, w tym kluczowy azot, ma większą wartość R^2 przy niższej liczbie „ n ”. Tym samym posiada większą wartość predycyjną. Obecność siarki w obu równaniach wskazuje na ten pierwiastek, jako ważny czynnik, warunkujący absorpcję światła przez liść, a tym samym istotny determinant wartości indeksu SPAD. Jak przedstawiono na ryc. 5.1, największe wartości SPAD otrzymano wówczas, gdy w liściu flagowym jednocześnie wzrastała zawartość obu pierwiastków, lecz większa dla S, prowadząca tym samym do zawężenia stosunku N/S. Natomiast, obecność Cu, a zwłaszcza Ca w pierwszym z powyższych równań potraktować należy jako składniki pokarmowe zakłócające funkcjonowanie układu odpowiedzialnego za gospodarkę N w kukurydzy.



Ryc. 5.1. Wartości indeksu SPAD w reakcji na zawartość siarki i azotu w liściu podkolbowym kukurydzy – doświadczenie nienawadniane.

Źródło: opracowanie własne.

Na obiekcie nawadnianym otrzymano nieco odmienne zakres pierwiastków determinujący wartości indeksu SPAD:

1) trzy sezony: 2020-2022:

$$SPAD = 298 + 8,84N + 0,33Na + 0,02Ca \text{ dla } n = 54, R^2 = 0,92 \text{ i } p \leq 0,001$$

2) dwa sezony: 2021 i 2022:

$$SPAD = 76 + 14,4N + 0,37Na + 0,024 Ca \text{ dla } n = 36, R^2 = 0,91 \text{ i } p \leq 0,001$$

W obu powyższych równaniach, niezależnie od liczby sezonów, obecny jest ten sam zestaw pierwiastków. Siarka wykazała bardzo istotny i silny związek korelacyjny z omawianym indeksem, lecz jeszcze większe, dodatnie zależności wykazała z sodem i wapniem. Na podstawie analizowanych zależności można wnioskować, że większe zbilansowanie siarki z azotem w warunkach nawadniania kukurydzy powodowało, że akumulacja w roślinie sodu i wapnia nie była krytycznym czynnikiem warunkującym absorpcję światła przez liść.

5.3. Bilans azotu w okresie wegetacji kukurydzy

W prowadzonych badaniach poza oceną stanu odżywienia kukurydzy, jak przedstawiono w poprzednim rozdziałach dyskusji, podjęto próbę opracowania bilansu azotu w systemie gleba/roślina. Bilans azotu wykonano dla dwóch okresów wegetacji kukurydzy. Pierwszy obejmował przedział od 4-go liścia do początku kwitnienia (BBCH 14 – BBCH 61), a drugi od początku kwitnienia do dojrzałości fizjologicznej (BBCH 61 – BBCH 89). Pierwszy z tych przedziałów obejmuje fazy rozwoju wegetatywnego kukurydzy (W) lub okres formowania elementów struktury plonu (OFP, *ang.* V or Yield Foundation Period – YFP). Drugi okres obejmuje fazy rozwoju reproduktywnego kukurydzy (R) i określany jest w praktyce rolniczej jako faza nalewania ziarna (FNZ, *R ang.* Grain Filling Period - GFP) (Sylvester-Bradley *et al.*, 2000; Grzebisz i Łukowiak, 2021). Okresy te odpowiadają za ostateczne ustalenie dwóch kluczowych elementów struktury plonu, czyli gęstości ziarniaków (LZ) i masy 1000 ziarniaków (MTZ) (Otegui i Bonhomme, 1998; Borrás i Vitantiano-Mazzini, 2018; Hisse *i in.*, 2019).

Saldo bilansowe składników pokarmowych jest różnicą między masą składnika pokarmowego wprowadzoną, a następnie po upływie określonego czasu (rok, sezon wegetacyjny), wyprowadzoną z jednoznacznie zdefiniowanego systemu produkcji rolnej (pole, gospodarstwo, zlewania wodna, jednostka administracyjna) (Europesn Commission Eurostat, 2013). W prowadzonych badaniach założono, że o plonie ziarna kukurydzy w takim samym stopniu decydują zasoby azotu zarówno w okresie wzrostu wegetatywnego (W), jak i reproduktywnego (R). Kryteriami wartości predykcyjnej zasobów azotu w systemie gleba/rośliny były plon ziarna (PLZ), gęstość ziarniaków w łanie (LZ) i masa 1000 ziarniaków (MTZ).

5.3.1. Zasoby azotu w stadium BBCH 14

W przeprowadzonych badaniach założono, że kluczowym celem oznaczenia N_{min} w glebie w stadium BBCH 14 jest nie tylko określenie zasobów tzw. nieorganicznego azotu, lecz także wyznaczenie krytycznego zakresu masy składnika niezbędnego dla formowania plonu ziarna. Masa N_{min14} , średnio dla lat i wariantów doświadczalnych, na obiekcie nienawadnianym wyniosła 145 kg N ha^{-1} , a na nawadnianym 122 kg N ha^{-1} , czyli była o 16% mniejsza. Masa N_{min} w stadium BBCH 14 posłużyła do obliczenia maksymalnego, średniego plonu ziarna (PLZM) (Grzebisz *i in.*, 2018 i 2022). Plon ten dla obu obiektów kształtował się odpowiednio, jak 7,253 t

ha⁻¹ i 9,278 t ha⁻¹ (+2,025 t ha⁻¹) (ryc. Z5.1 i 2). Produktywność jednostkowa N_{min14} brutto (PJN_{min}B) w stanowisku nienawadnianym wyniosła 57,8 kg ziarna kg⁻¹ N_{min}, a w nawadnianym 85,3 kg ziarna kg⁻¹ N_{min}. Zatem w wyniku nawadniania efekt plonotwórczego działania N_{min} zwiększył się o 47,5%. Na tej podstawie, uwzględniając wartość luki azotowej wyznaczono zakres optymalny N_{min}. Na obiekcie z naturalnymi warunkami opadowymi zakres ten wynosił 127 – 145 kg N ha⁻¹ a na nawadnianym był mniejszy, kształtując się w zakresie 108 – 122 kg N ha⁻¹. Wyraźnie mniejszy zakres przedziału N_{min} w stadium BBCH 14 wynika ze znacznie większej efektywności N_{min} na obiekcie nawadnianym.

Drugim aspektem rozważań nad gospodarką azotem w tym stadium wegetacji kukurydzy jest rozmieszczenie N_{min} w glebie, uwzględniając warstwy i formy nieorganicznego azotu w glebie. Ogólnie w stadium BBCH 14 dominowała forma azotanowa (N-NO₃), stanowiąc średnio 77% na obiekcie nienawadnianym i 70% na nawadnianym. W naturalnych warunkach wodnych zastosowanie siarki zwiększyło udział N-NO₃ głównie na kontroli N, wzrastając z 65% na NPK do 71% na NPK-S0. Natomiast na kombinacjach z azotem udział N-NO₃, niezależnie od dawki, przekraczał 80%. Na obiekcie nawadnianym udział N-NO₃ był zdecydowanie mniejszy, wykazując na kontroli N trend spadkowy z 64% na NPK do 57% na NPK-CaS. Natomiast na kombinacjach nawożonych azotem przekraczał 70%, wzrastając wraz ze wzrostem dawki (71% → 77%). Dominujący udział azotanów w puli N_{min} wskazuje na dużą intensywność nityfikacji w glebie, wspomaganą zastosowaniem siarki. Postawiony wniosek uwiarygadnia także fakt, że azotany w warstwie 0-30 cm, stanowiły odpowiednio 46,2% i 42,4% całej puli N_{min} w glebie. Z przedstawionego zestawienia wynika, że w naturalnych warunkach opadowych intensywność nityfikacji zależała zarówno od warunków wodnych, jak i formy zastosowanej siarki. Nawadnianie zniwelowało rolę nośnika tego składnika. Wpływ współdziałania dawki azotu i nośnika siarki na udział N-NO₃ w puli N_{min} były odmienny w zależności od warunków wodnych. Na obiekcie naturalnym odnotowano wzrost udziału N-NO₃ z 48% do około 55% w reakcji na wprowadzenie siarki do systemu. Natomiast na obiekcie nawadnianym wzrost ten był mniejszy i odzwierciedlał głównie wielkość dawki azotu.

Trzecim aspektem dyskusji w tym zakresie jest ocena predykcyjnej wartości N_{min}, uwzględniając formę składnika i warstwę gleby. Związki korelacyjne między N_{min}, a plonem i podstawowymi składowymi plonu, czyli LZ i MTZ, były istotne, lecz słabe i zostały odnotowane tylko na obiekcie nienawadnianym (zał. 5.6). Badania

prorowadzone w Turcji potwierdzają w pełni ten wniosek (*Ibrikci i in., 2018*). Autorzy tych badań oznaczali zawartość N_{\min} w glebie do głębokości 90 (w odstępach co 30 cm) w okresie przed siewem i po zbiorze kukurydzy, lecz nie stwierdzili w kolejnych latach badań istotnego związku z plonem. Jednakże synteza z lat wykazała niewielki, dodatni związek N_{\min} z plonem ziarna. Analogiczny wniosek wysnuto na podstawie badań prowadzonych w ostatnich latach w USA (*Ransom i in., 2020*). Autorzy stwierdzili, że nie ma uniwersalnego narzędzia diagnostycznego do wyznaczenia optymalnej ekonomicznie dawki azotu w kukurydzy.

W badaniach własnych, krytycznymi dla prognozy plonu, pomimo zdecydowanej dominacji N_{\min} w warstwie 0-30, okazały się warstwy głębsze. Niezależnie od warunków wodnych, istotną rolę w predykcji plonu odgrywała masa N-NO₃. Na obiekcie nienawadnianym dotyczyło to warstwy 30-60 cm. Na obiekcie nawadnianym krytyczną okazała się warstwa 60-90 cm. Krytyczna rola warstwy 60-90 wskazuje na bardziej dynamiczny wzrost roślin, ściślej systemu korzeniowego, rosnących w naturalnych warunkach opadowych. Jest to możliwe, gdyż kukurydza jest zaliczana do grupy żywieniowej roślin określanej akronimem SCD (steep, cheep and deep). Niedobór azotanów w środowisku wzrostu rośliny stymuluje bowiem wzrost korzeni w głąb gleby (*Lynch, 2013; Giehl i Wiren, 2014*). N-NO₃ jako jeden z wielu testowanych w USA form N w glebie wykazał związek z wielkością optymalnej dawki N, lecz związek ten był słaby ($R^2 = 0,2$ dla $p \leq 0,01$) (*Ransom i in., 2020*). Jednakże, jak przedstawiono na ryc. Z5.1 i 5.2 masa N_{\min} w glebie jest ważnym wskaźnikiem plonu, lecz pod warunkiem uprzedniego wyznaczenia optymalnego zakresu dla maksymalnego plonu ziarna w danych warunkach klimatyczno-glebowych.

Masa azotu zakumulowana przez roślinę w stadium BBCH 14 (NA₁₄) jest traktowana jako wskaźnik potencjału kukurydzy do formowania elementów struktury plonu w okresie od BBCH 16 do 71 (*Peng i in., 2010*). Otrzymane wyniki nie potwierdziły tej prawidłowości, gdyż uzyskane zależności były istotne, lecz słabe. Masa zakumulowanego azotu w kukurydzy w tym stadium pozwoliła na predykcję plonu ziarna i MTZ. Poziom predykcji był istotny, lecz niski, aczkolwiek nieznacznie większy na obiekcie nawadnianym (zał. 5.6). Na uwagę zwraca fakt, że istotnie mniejszą masę azotu, średnio, notowano w obu doświadczeniach na obiektach z siarką. Taka reakcja roślin wskazuje na istotne zahamowanie akumulacji azotu przez kukurydżę na początku wegetacji w następstwie zastosowania siarki. Przyczyną mogła być immobilizacja azotu

przez mikroorganizmy w wyniku wprowadzenia do gleby czynnika krytycznego, jakim jest właśnie siarka (Chaudhary i in., 2023).

Trzecim kryterium oceny gospodarki azotem w stadium BBCH 14 jest zasób N w systemie gleba/roślina (N_{in14}), który obejmuje N_{min} w warstwie 0-90 cm i masę składnika w roślinie w stadium BBCH 14. Zasób ten potraktowano jako istotny w początkowym etapie formowania elementów struktury plonu przez kukurydzę. Masa N_{in14} na kontroli N była bardzo duża, a zastosowanie siarki ją zwiększyło (tab. 5.3).

Tabela 5.3. Względna efektywność – dostępność N z nawozów w stadium BBCH 14

Obiekt	Dawki N kg ha ⁻¹	Nienawadniany			Nawadniany		
		kg N ha ⁻¹		%	kg N ha ⁻¹		%
NPK	0	93	-	-	85	-	-
	120	153	60	50,2	126	41	34,2
	160	194	101	63,2	187	102	63,4
NPK-S0	0	99	-	-	86	-	-
	120	178	79	65,9	126	40	33,3
	160	225	126	78,8	186	100	62,3
NPK-CaS	0	103	-	-	78	-	-
	120	163	60	50,3	119	41	34,4
	160	208	106	66,0	167	89	55,8
Średnia		157	89	62	129	69	40
OSD ¹		49,4	26,6	10,9	42,5	31,0	22,4
WZ,% ¹		31	30	17	33	45	55

¹odchylenie standardowe; WZ – współczynnik zmienności. Źródło: opracowanie własne.

Analiza zasobów azotu na kombinacjach nawożonych tym składnikiem wykazała, że część zastosowana w moczniku z inhibitorem ureazy uległa uwstecznieniu lub stracie. Z obliczeń przedstawionych w tab. 5.3 jednoznacznie wynika, że głównym czynnikiem sprawczym otrzymanego salda bilansowego były warunki wodne w jakich prowadzono doświadczenia. Na obiekcie nienawadnianym ubytek azotu ujawnił się w większym stopniu na NPK i NPK-CaS, niż na NPK-S0. Ponadto okazał się większy na kombinacji z mniejszą dawką azotu, czyli 120 kg N ha⁻¹. Na tej kombinacji efektywność zastosowanego w nawozie N wyniosła około 50%. Natomiast na obiekcie nawadnianym ubyło ²/₃ N wprowadzonego w nawozie. W konsekwencji, średnia masa azotu na obiekcie nienawadnianym wyniosła 157 kg ha⁻¹, a na nawadnianym była mniejsza o 18%, wynosząc 129 kg ha⁻¹.

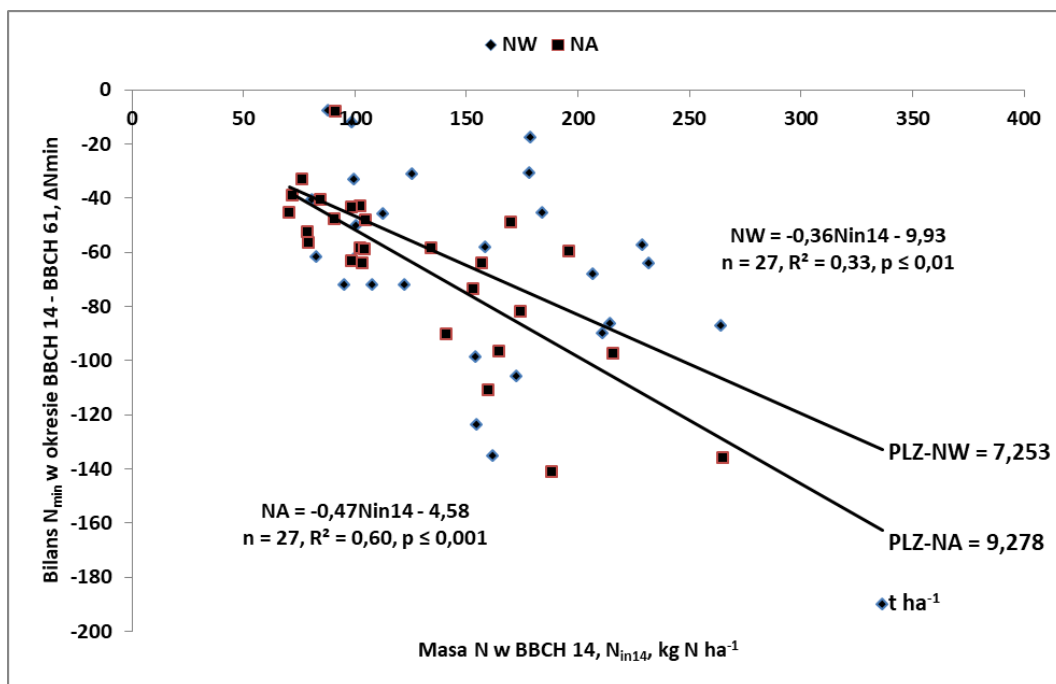
Można więc stwierdzić, że przyczyną wyraźniej mniejszej masy roślin kukurydzy w stadium BBCH 14 na obiekcie nawadnianym były mniejsze zasoby azotu w systemie gleba/roślina. Jest to wysoce prawdopodobny wniosek, gdyż zjawisko to ujawniło się w

każdym roku badań. Udzielenie jednoznacznego wyjaśnienia przyczyny generalnie małej efektywności azotu w stadium BBCH 14, nie jest łatwym zadaniem. Po pierwsze zjawisko to może wynikać z formy zastosowanego azotu, którym był mocznik z NBPT (triamid kwasu N-(n-butylo) trifosforowego). Badania przeprowadzone przez *Viero i in (2017)* wykazały, że straty N z mocznika, bez względu na obecność inhibitora nityfikacji, są większe w glebie o większej wilgotności. Mało prawdopodobna jest także hipoteza, że uwstecznienie azotu z nawozu w okresie od zastosowania do stadium BBCH 14, nastąpiło w wyniku wprowadzenia do gleby siarki. Tego zjawiska nie odnotowano na obiekcie nienawadnianym, na którym masa N_{\min} w doświadczeniu na obiekcie z siarką była istotnie większa, niż na obiekcie NPK. Natomiast na obiekcie nawadnianym, masa N_{\min} na kombinacji 120 kg N ha^{-1} nie wykazała reakcji na zastosowanie siarki. Jednakże możliwe jest uwstecznienie wprowadzonego do gleby azotu w nawozie w wyniku ogólnego wzrostu aktywności mikroorganizmów. Na to zjawisko wskazuje bardzo duża masa N w systemie gleba/roślina na kontroli N, a także fakt, że ubytek azotu notowano w takiej samej skali także na obiekcie NPK.

5.3.2. Zasoby N w okresie wzrostu wegetatywnego

Stan rozwoju kolby, czyli wielkość akceptora fizjologicznego kukurydzy w stadium BBCH 60 określa realne zapotrzebowania rośliny na asymilaty, których produkcja zależy od aktywności fotosyntetycznej liści, czyli od wielkości źródła asymilatów (ang. sink – source relationship) (*Borras i Vitantiano-Mazzini, 2018; Hisse i in., 2019*).

Całkowita masa N_{\min} w okresie od BBCH 14 do BBCH 61 uległa znacznej redukcji, lecz zmiennie zależnie od warunków wodnych, w jakich prowadzono doświadczenia, formy azotu i warstwy gleby. Ogólnie większy, bezwzględny i względny ubytek N_{\min} w stosunku do stanu w BBCH 14, odnotowano na obiekcie nawadnianym w stosunku do nienawadnianego (51% vs. 44%). Stan ten potwierdza większą dynamikę wzrostu roślin w warunkach optymalizacji warunków wodnych (ryc. 5.2). Dynamika ubytku N_{\min} , jak wynika z analizy współczynnika kierunkowego równań, była o 30,5 % większa właśnie na obiekcie nawadnianym. Średni, maksymalny plon ziarna, szacowany na podstawie zawartości N_{\min} w stadium BBCH 61, był większy o 28%. Zatem ubytek masy N_{\min} , jak i tempo tego procesu w okresie BBCH 14 – BBCH 61 jest istotnym wskaźnikiem plonu kukurydzy.



Ryc. 5.2. Bilans N_{min} w okresie wzrostu wegetatywnego kukurydzy jako funkcja masy N w systemie gleba roślina w stadium BBCH 14.

Źródło: opracowanie własne.

NW – doświadczenie nienawadniane; NA – doświadczenie nawadniane; PLZ – plon ziarna.

Istotnym elementem rozważań w stadium BBCH 61 jest struktura i zmiana udziału obu form N nieorganicznego w glebie w stosunku do BBCH 14. Ubytek N_{min}, głównie w formie N-NO₃, wystąpił na obu obiektach, przekraczając 60% (66% - nienawadniany; 63% - nawadniany). Specyficzne zmiany odnotowano dla N-NH₄, gdyż na obiekcie nienawadnianym nastąpił względny wzrost masy i udziału tej formy azotu o prawie 40%, a na nawadnianym odnotowano natomiast spadek o 20% w stosunku do BBCH 14. Ocena kierunku zmian N-NH₄ jest trudna do określenia, gdyż jest to jednocześnie forma bezpośrednio pobierana przez roślinę, jak i substrat w procesie nitryfikacji. Jednakże, to właśnie pierwszy etap mineralizacji azotu organicznego, czyli intensywność amonifikacji, jest kluczowy dla gospodarki azotem w tym okresie wegetacji (Osterholz i in., 2017). Spadek masy N-NO₃ zachodził głównie w warstwie 0-30 cm, wynosząc na obu obiektach około 87% stanu w stadium BBCH 14. W dodatku ubytek azotanów z gleby wzrastał z dawką azotu, wykazując większe wartości na obiektach z siarką, zwłaszcza na NPK-S0. Na obu obiektach ubytek azotanów obejmował całą warstwę gleby 0-60 cm. Na nienawadnianym na niektórych kombinacjach obejmował także warstwę 60-90 cm. Na nawadnianym, tylko na NPK wystąpił także na w warstwie 60-90 cm.

Jak przedstawiono powyżej rośliny w stadium BBCH 61 pobierały azot także z warstwy 60-90. Plonotwórcze znaczenie zasobów N_{\min} w tej warstwie potwierdziły analizy szczegółowe. Największą, a do tego wysoce wiarygodną, predykcję plonu ziarna na obiekcie nienawadnianym, uzyskano dla $N-NH_4$ w warstwie 60-90 cm ($R^2 = 0,57$ i $p \leq 0,001$). Prawie taki sam poziom predykcji plonu otrzymano dla N_{\min} także w tej warstwie gleby ($R^2 = 0,51$ i $p \leq 0,001$). Natomiast na obiekcie nawadnianym największą wartość diagnostyczną dla predykcji plonu ziarna stwierdzono tylko dla masy N_{\min} w warstwie 0-30 cm. Wartość współczynnika determinacji była jednak bardzo mała ($R^2 = 0,22$; $p \leq 0,05$).

Efektom biologicznym plonotwórczego działania nieorganicznych form azotu, obecnych w strefie ukorzenia rośliny w okresie wegetatywnym, jest masa rośliny i masa zawartego w niej azotu, czyli masa składnika w roślinie (NA_{61}). W stosunku do BBCH 14 odnotowano wielokrotny wzrost masy rośliny. Wartość NA_{61} zwiększyła się 11- i 22-krotnie, odpowiednio na obiekcie nienawadnianym i nawadnianym, a jej udział w masie azotu zakumulowanego przez kukurydzę w stadium dojrzałości fizjologicznej wyniósł 56% i 75%. Jak podaje *Peng i in. (2010)* W okresie intensywnego wzrostu pędu nadziemnego, czyli od BBCH 16 do początku kwitnienia masa azotu w kukurydzy, niezależnie od genotypu, zwiększyła się do około 75% masy całkowitej. Jednocześnie w okresie od 35 do 76 dnia od siewu odnotowano intensywny, lecz skoordynowany z dynamiką wzrostu pędu nadziemnego wzrost korzeni pochodzących z węzłów pędu nadziemnego. Koniec tego okresu w polskich warunkach przypada na koniec czerwca, co związane jest z początkiem intensywnego wzrostu pędu nadziemnego. Zróżnicowanie biomasy kukurydzy w stadium BBCH 61 wynikało z masy zakumulowanego azotu, która w 2020 i 2022 była znacząco większa na obiekcie nawadnianym, niż nienawadnianym (+20 i +65 kg N ha⁻¹). Kluczowym faktem w tym okresie wegetacji kukurydzy jest absolutny wzrost masy azotu zakumulowanej w biomase kukurydzy na początku kwitnienia kukurydzy. Dynamika akumulacji składnika w okresie wegetatywnym wzrostu kukurydzy, który trwał 35 dni, wykazała silną zmienność zarówno w latach, jak i w wyniku działania czynników doświadczalnych. Najmniejszą dynamikę (tylko dla średnich) wynoszącą zaledwie 2,8 kg N d⁻¹ ha⁻¹ odnotowano w 2021 i to niezależnie od warunków wodnych prowadzenia doświadczeń. Wpływ tego czynnika zaznaczył się wyraźnie w 2020, lecz znacznie silniej w 2022, w którym na obiekcie nawadnianym dynamika akumulacji azotu była o

40% większa (4,7 vs. 6,6 kg N d⁻¹ ha⁻¹, odpowiednio nienawadniany i nawadniany). Działanie siarki, ściślej siarczanu wapnia ujawniło się na obu tych obiektach (+10% i 7,4%), aczkolwiek większe bezwzględne wartości notowano obiekcie nawadnianym.

Uzyskane wyniki potwierdzają silną reakcję kukurydzy, przejawiająca się wzrostem akumulacji N w stanowiskach zasobnych w azot. Natomiast niedobór składnika w glebie prowadzi do redukcji masy nadziemnej rośliny. Dynamika wzrostu pędów nadziemnych kukurydzy, wynikająca pierwotnie z zaopatrzenia w azot, zwrótnie stymuluje aktywność procesów pobierania tego pierwiastka przez kukurydzę z gleby. Procesy ten wynikają z dynamiki wzrostu korzeni w glebie, który jest najbardziej intensywny w okresie od stadium 6-tego liścia do kwitnienia (*Liu i in., 2017; Asibi i in., 2019*).

W przeprowadzonych doświadczeniach, na obiekcie nienawadnianym nie odnotowano istotnych związków między masą azotu w biomacie kukurydzy a LZ i MTZ, a w konsekwencji z PLZ. Natomiast na nawadnianym zależności te były istotne, a najwyższą otrzymano dla związku NA₆₁ z PLZ ($R^2 = 0,43$, $p \leq 0,001$). Istotny, dodatni związek między NA₆₁ a LZ w warunkach nawadniania potwierdza rolę zaopatrzenia kukurydzy w azot w omawianym okresie wegetacji jako czynnik warunkujący formowanie się struktury plonu już przed kwitnieniem (*Nasielski i in., 2019*). Dominacja MTZ w procesie formowania plonu ziarna wskazuje na brak konkurencji między ziarniakami w kolbie w okresie po kwitnieniu. Zjawisko to może być potraktowane jako proces kompensacji, wynikający z niedostatecznej gęstości ziarniaków w kolbie (*Hisse i in., 2019*).

Reakcję kukurydzy w okresie wzrostu wegetatywnego na zasoby azotu w systemie gleba/rośliny oceniono na podstawie dwóch wskaźników, czyli masy N w systemie gleba/roślina (N_{in61}), będącego sumą N_{min} w glebie, masy azotu w roślinie (NA_{61}) oraz masy N uwolnionego z zasobów glebowych (N_{g61}) (zał. 5.7). Pierwszy z tych wskaźników okazał się kluczowy do oceny stanu gospodarki N w omawianym okresie wegetacji kukurydzy. W obu doświadczeniach wartości N_{in61} były wyraźnie większe niż w N_{in14} , aczkolwiek różnica między obiektami była nieznaczna. Odnotowana wartość N_{g61} jednoznacznie wskazuje na zwiększenie dostępnych zasobów azotu w okresie BBCH 14 do BBCH 61 w następstwie netto uruchomienia składnika z zasobów glebowych. Średnio na obiekcie nienawadnianym zasoby azotu zwiększyły się o 69,2 a na nawadnianym o 104 kg N ha⁻¹ (+50,3%). Wpływ systemów nawożenia siarką i dawek azotu na ten wskaźnik zależał od warunków wodnych w trakcie

wegetacji kukurydzy. W naturalnych warunkach wodnych, zastosowanie siarki spowodowało redukcję masy uwolnionego N_{\min} z gleby, wynikającą ze spowolnienia procesu uruchamiania zasobów glebowych N. Zjawisko to ujawniło się w każdym roku badań na obiekcie z S^0 i jednoznacznie wskazuje, że stosowanie siarki elementarnej tuż przed siewem kukurydzy może prowadzić do uwstecznienia zasobów N_{\min} w glebie. Natomiast na obiekcie nawadnianym zastosowanie siarki, niezależnie od formy, zwiększyło zasoby przyswajalnego N w glebie. Wzrost ten wyniósł $26,4 \text{ kg N ha}^{-1}$ (+31,8%) na obiekcie z S^0 i $37,2 \text{ kg N ha}^{-1}$ (+44,8%) na obiekcie z siarczanem wapnia. Przyjmując wartość jednostkowego nagromadzenia N przez kukurydzę na poziomi 30-32 kg t^{-1} ziarna (+ odpowiednia masa słomy) (Pikuła, 2014), średni przyrost plonu ziarna w wyniku zastosowania siarki wyniósłby odpowiednio 0,83-0,88 i 1,16-1,24 t ha^{-1} . Należy podkreślić jeszcze jeden fakt, a mianowicie to, że największy przyrost netto azotu w glebie, niezależnie od warunków wodnych, wystąpił na kombinacji nawożonej 120 kg N ha^{-1} . Powyżej przedstawione rozważania w pełni potwierdzają wyniki badań Osterholz'a i in. (2017).

Wskaźnik, jakim jest N_{in61} , niezależnie od warunków wodnych prowadzenia doświadczenia, wykazał istotny związek z plonem ziarna i podstawowymi elementami struktury plonu. Należy wyraźnie podkreślić, że siła predykcji plonu, określona przez R^2 , była znacznie wyższa dla kukurydzy nawadnianej (0,60 vs. 0,33). Podobne relacje odnotowano dla elementów struktury plonu, lecz należy wyraźnie podkreślić, że znacznie większe wartości R^2 notowano dla MTZ niż LZ (zał. 5.7) Taki układ zależności ponownie wskazuje na MTZ jako główny determinant plonu w warunkach prowadzonych badań.

W okresie wegetacji, wzrost zawartości azotu dostępnego (mineralnego) w badaniach prowadzonych w Kanadzie (Ontario) odnotowano w okresie 120-180 od początku roku (mniej więcej maj i czerwiec), a spadek rozpoczął się od 230-260 (mniej więcej od połowy lipca do połowy sierpnia) dnia od początku roku (Beauchamp i in., 2004). Pomiary wykonane w tym drugim terminie wykazały, że na obiekcie bez azotu, zawartość przyswajalnego N (wyciąg z tzw. gorącym KCl) wykazała bardzo silną korelację z plonem (R^2 wahał się od 0,63 do 0,93). Na obiektach nawożonych azotem wartość R^2 była mniejsza i wahała się od 0,34 do 0,88. Cytowane wyniki potwierdzają istotne znaczenie w/w wymienionych okresów wegetacji kukurydzy dla uruchomienia N_{\min} z zasobów glebowych. W warunkach prowadzenia doświadczeń własnych, początek kwitnienia kukurydzy przypadał na 3-dekadę lipca, a więc w okresie

wyraźnego spadku procesów mineralizacji N organicznego w glebie. Całkowita masa N_{\min} ($N_{\min61}$) w glebie niezależnie od formy nieorganicznego N, wykazała silny związek z masą składnika w warstwie 60-90 cm ($r = 0,99^{***}$). Jednakże istotny związek z plonem ziarna odnotowano tylko na obiekcie nienawadnianym ($R^2 = 0,49$ dla $N_{\min61}$ i $R^2 = 0,59$ dla masy N-NH₄ w warstwie 60-90 cm).

5.3.3. Faza nalewania ziarna

Krytyczny okres formowania struktury kolby w kukurydzy rozpoczyna się od stadium wyrzucania wiechy (BBCH 51) i trwa przez cały okres kwitnienia, kończąc się w stadium tzw. dojrzałości wodnistej ziarniaka (< 15% s.m., BBCH 71) (*Borras i Vitantiano-Mazzini, 2018*). W tym okresie wegetacji kukurydza wykształca podstawowe elementy struktury plonu, jakimi są liczba ziarniaków w rzędzie (LZR) i liczba ziarniaków w kolbie (*Otegui i Bonhomme, 1998; Hisse i in., 2019*). Istotną cechą współczesnych odmian kukurydzy (*Stay green*) jest duża aktywność fotosyntetyczna liści po kwitnieniu. Stan ten może być zapewniony tylko pod warunkiem aktywnego pobierania azotu przez rośliny z gleby (*Ning i in., 2017*).

Istotnym elementem rozważań w okresie reprodukcyjnym rozwoju kukurydzy, analogicznie, jak w okresie wegetacyjnym, jest struktura i udział obu form N nieorganicznego w glebie w stosunku do BBCH 61. Ogólna ocena bilansu N_{\min} przeprowadzona w tym okresie wegetacji kukurydzy (BBCH 61 – BBCH 89) wskazuje na zmniejszenie się masy N_{\min} w glebie, której bilans był większy na obiekcie nienawadnianym, niż nawadnianym (81,0 vs. 62,9 kg N ha⁻¹; 60 vs. 54,1 kg N ha⁻¹). Na obiekcie nienawadnianym netto ubytek N_{\min} wystąpił głównie w 2021 na obiekcie NPK i NPK-S0 i zasadniczo obejmował tylko N-NH₄. Tylko na tym obiekcie możliwe było wyznaczenie wartości granicznej bilansu obu form, poniżej której następował spadek masy N_{\min} w glebie w stosunku do stanu zasobów N w glebie z początku kwitnienia:

$$\Delta N_{\min89} = -0,33N_{\min61} + 56,8 \text{ dla } n = 27, R^2 = 0,60 \text{ i } p \leq 0,001$$

Teoretycznie, netto uwalnianie N_{\min} z zasobów glebowych zachodziło, gdy N_{in61} kształtował się poniżej 172 kg N ha⁻¹. Tak małe zasoby składnika występowały głównie na kontroli N w pierwszych dwóch latach badań. Natomiast na obiekcie nawadnianym, ubytek N_{\min} występował tylko na kontroli N i także dotyczył N-NH₄. Jednakże, trend ten nie został potwierdzony statystycznie. Prognoza plonu, czy też elementów struktury plonu była możliwa tylko dla obiektu nienawadnianego i dotyczyła PLZ i MTZ. Z

przeprowadzonej analizy regresji krokowej, uwzględniając warstwy i formy N_{\min} w glebie, wynika, że istotną predykcję plonu uzyskano dla N-NH₄ w warstwie 30-60 cm ($R^2 = 0,39$ i $p \leq 0,001$) (zał. 5.8).

W stadium dojrzałości fizjologicznej kukurydzy kluczowymi wskaźnikami gospodarki azotem, istotnie kształtującymi plon ziarna, była masa azotu zakumulowana w ziarnie (NAz) i całkowita masa azotu w kukurydzy (NAc). Uzyskane zależności w pełni potwierdzają dotychczasowe wyniki badań w tym zakresie (*Peng i in., 2013; Fang i Su, 2019*). Wartości współczynnika R^2 dla NAz były największe spośród analizowanych predyktorów plonu (zał. 5.8). Ponadto, co należy wyraźnie podkreślić, większe wartości R^2 otrzymano dla obiektu nawadnianego, który charakteryzował się większą liczbą ziarniaków w kolbie, a w konsekwencji większą gęstością ziarniaków w łanie. Znaczenie LZ jako cechy diagnostycznej plonu ziarna, jak już wcześniej sygnalizowano, zostało w pełni potwierdzone w stadium dojrzałości fizjologicznej kukurydzy. Otrzymana zależność potwierdza koncepcję plonotwórczą *Körner'a (2015)*, według której cecha ta w procesie formowania plonu jest wskaźnikiem dominacji akceptora fizjologicznego nad źródłem azotu, czyli zasobami składnika w organach wegetatywnych rośliny. Jednakże w omawianym przypadku i to niezależnie od warunków wodnych prowadzenia badań, wartości R^2 dla MTZ były co najmniej równe LZ na obiekcie nienawadnianym, a większe na nawadnianym (50% vs. 50% na nienawadnianym i 61% vs. 55% na nawadnianym).

Otrzymane zależności i wartości omawianych elementów struktury plonu, potwierdzają stan formowania plonu obserwowany już na początku kwitnienia. Wzrost ziarniaków, a więc procesy warunkujące masę pojedynczego ziarniaka, w warunkach dobrego zaopatrzenia rośliny w asymilaty w okresie nalewania ziarna, nie zależały od liczby ziarniaków w kolbie. Jest to właśnie cecha, która w określonych warunkach wegetacji ujawnia się w kukurydzy. Stan ten, czyli wzrost masy ziarniaka niezależnie od liczby ziarniaków w kolbie, jest możliwy tylko w warunkach utrzymującej się aktywności fotosyntetycznej liści kukurydzy po kwitnieniu (*Fernandez i in., 2021*). Warunek ten został w pełni potwierdzony w przeprowadzonych badaniach. Odnotowaną prawidłowość uzasadniają dodatnie i istotne związki zachodzące między całkowitą masą azotu w kukurydzy w stadium dojrzałości fizjologicznej (NAc) a plonem ziarna. Zmienność tej cechy na obiekcie nawadnianym tłumaczy w 70% a na nienawadnianym tylko w 28% zmienność plonów ziarna. W dodatku na obu obiektach cecha ta wykazała większy związek z MTZ niż z LZ. Wniosek ten w pełni potwierdza

zmiennosc wartości azotowego indeksu żniwnego (IN). Wartości azotowego indeksu żniwnego dla azotu kształtuje się na poziomie około 60%. Wskaźnik ten wykazuje silną reakcję na dawki azotu (*Bender i in., 2013; Singh i in., 2023*). W doświadczeniu własnym, prowadzonym w warunkach nawadniania, wartości tego indeksu kształtowały się w 2021 i 2022 na poziomie około 50%. Natomiast w warunkach naturalnych prowadzenia ładu, czyli w doświadczeniu nienawadnianym, omawiany indeks w 2021 osiągnął 50%, a w optymalnym 2022, zaledwie 32%. Nawadnianie, niezależnie od systemu stosowania azotu prowadzi do wzrostu zawartości azotu w słomie (*Irmak i in., 2023*). Podstawową przyczyną tak niskich wartości indeksu azotowego było zakłócenie gospodarki N w okresie przed kwitnieniem, prowadzące do spadku gęstości ziarniaków w kolbie.

Istotną kwestią do rozważenia w fazie nalewania ziarna jest gospodarka zasobami N w systemie gleba/roślina. Stan początkowy okresu reproduktywnego wyznaczają zasoby azotu w systemie gleba/roślina na początku kwitnienia (N_{in61}), który jak omówiono w rozdziale 5.3.2 wykazał istotny wpływ na podstawowe elementy struktury plonu, a w konsekwencji na plon ziarna. W stanie równowagi, czyli dla $N_{in61} = N_{in89}$ masa azotu w systemie gleba roślina (N_{g89}) zwiększyła się o 59,9 kg ha⁻¹ na obiekcie nienawadnianym i o 42,4 kg N ha⁻¹ na obiekcie nawadnianym. Całkowite zasoby N w systemie gleba roślina, czyli N_{in89} istotnie zależały od masy netto N uruchomionego z zasobów glebowych (N_{g89}), lecz tylko na obiekcie nienawadnianym:

$$N_{in89} = 1,39N_{g89} + 186 \text{ dla } n = 27, R^2 = 0,82, p \leq 0,001$$

Nie otrzymano tej zależności dla obiektu nawadnianego. Jednocześnie N_{g89} tylko na obiekcie nienawadnianym istotnie, lecz na umiarkowanym poziomie ($R^2 = 0,32$), determinował plon ziarna. Natomiast poziom predykcji plonu na podstawie N_{in89} był istotny, niezależnie od wariantu wodnego. Jednakże zdecydowanie silniejszy na obiekcie nawadnianym. Odmienne niż dla NAz, plon ziarna w naturalnych warunkach opadowych zależał w znacznym stopniu od MTZ, a w warunkach nawadniania od obu komponentów plonu (zał. 5.8). Otrzymane wyniki jednoznacznie wskazują, że w naturalnych warunkach opadowych, istotny wpływ na plon mają zasoby N uruchomione z zasobów glebowych po kwitnieniu. Zgodnie z koncepcją *Körner'a (2015)* wielkość akceptora fizjologicznego (LZ) była zbyt mała względem zasobów azotu w roślinie, lecz jednocześnie roślina nie korzystała w pełni z tych zasobów. Zjawisko to w warunkach prowadzonego doświadczenia wynikało prawdopodobnie nie tyle z

niedoboru N w organach wegetatywnych kukurydzy, lecz prawdopodobnie ze zbyt małej remobilizacji składnika. Na taki stan wskazuje ekstremalnie niska wartość indeksu żniwnego. W warunkach deszczownia zasoby te wystarczały do pokrycia potrzeb ziarniaków na co wskazuje równowaga między LZ i MTZ w formowaniu plonu ziarna.

6. Podsumowanie i wnioski

6.1. Podsumowanie

W prowadzonych badaniach przyjęto hipotezę, że o plonie ziarna kukurydzy w takim samym stopniu decydują zasoby azotu w systemie gleba/roślina zarówno w okresie wzrostu wegetatywnego, czyli przed kwitnieniem, jak i reproduktywnego, czyli po kwitnieniu (tzw. faza nalewania ziarna). Czynniki doświadczalne, a więc warunki wodne w trakcie wegetacji, a także wprowadzenie siarki do technologii produkcji kukurydzy na ziarno kształtują dostępność azotu nieorganicznego z zasobów naturalnych azotu (kontrola azotowa), jak i zasobów wprowadzonych z określonymi dawkami nawozów azotowych.

Walidację postawionej hipotezy przeprowadzono w dwóch niezależnych doświadczeniach, zróżnicowanych jedynie warunkami wodnymi. W pierwszym wegetacja kukurydzy odbywała się w naturalnych warunkach opadowych. W drugim roślina była deszczowana w sytuacji oczekiwanego niedoboru wody w glebie. Czynnikiem doświadczenia były: (1) trzy systemy nawożenia siarką: a. NPK (kontrola siarkowa), b. NPK-S0 (siarka elementarna – nośnik siarki), c. NPK-CaS (siarczan wapnia – nośnik siarki); (2) kontrola azotowa plus pięć dawek azotu: 0, 40, 80, 120, 160 i 200 kg N ha⁻¹. Azot zastosowano w formie mocznika z inhibitorem ureazy (triamid kwasu N-(n-butylo) trifosforowego (NBPT)).

Maksymalne plony ziarna kukurydzy w warunkach naturalnego opadu (obiekt niedeszczowany) osiągały 8,0 na NPK; 8,1 na NPK-S0; 8,0 t ha⁻¹ na NPK-CaS i zostały uzyskane dla dawek azotu kształtujących się, odpowiednio, jak 136, 200 i 126 kg N ha⁻¹. Dla kukurydzy deszczowanej (obiekt nawadniany) wartości te kształtowały się odpowiednio jak 10,5; 10,0 i 10,1 dla optymalnej dawki azotu, wynoszącej odpowiednio 154,2; 123,3 i 118,8 kg N ha⁻¹. Produktywność jednostkowa azotu była więc wyraźnie większa w warunkach deszczowania, wynosząc odpowiednio 85; 68,1 i 81, podczas gdy w naturalnych warunkach opadowych kształtowała się, jak 58,9; 40,5 i 67,5 kg ziarna kg⁻¹ N nawozowego. Najbardziej stabilne plony w naturalnych warunkach opadowych uzyskano na obiekcie z siarczanem wapnia. Większe plony ziarna w warunkach deszczowania wynikały bezpośrednio ze wzrostu gęstości ziarniaków na jednostce powierzchni i w mniejszym stopniu ze wzrostu masy 1000 ziarniaków. Dodatkowo działanie siarczanu wapnia na obiekcie nienawadnianym ujawniło się w zakresie dawek 0-80 kg N ha⁻¹, prowadząc do istotnego wzrostu plonu ziarna.

Siarka elementarna, niezależnie od warunków wodnych, dopiero przy największej dawce azotu (200 kg ha^{-1}) istotnie zwiększyła plon ziarna w stosunku do wariantu kontrolnego (NPK).

Plon ziarna kukurydzy niedeszczowanej w decydującym stopniu zależał od masy 1000 ziarniaków (MTZ). Deszczowanie równoważyło wpływ obu podstawowych elementów struktury plonu, czyli gęstości ziarniaków (LZ) i MTZ na plon ziarna. Zawartość azotu w ziarnie była wyraźnie mniejsza na obiekcie nawadnianym, co przy jednoczesnej mniejszej zawartości składnika w słomie, wskazuje na ujawnienie się efektu *rozcieńczenia*. Głównym źródłem azotu dla ziarniaków w kukurydzy nawadnianej był pęd a nienawadnianej składnik pobierany z gleby po kwitnieniu. Stan ten wynikał z ograniczonej remobilizacji azotu z części wegetatywnych kukurydzy w okresie nalewania ziarna.

Rośliny w całym okresie wegetacji wykazały bardzo dobry stan odżywienia azotem, wykazując w stadium kwitnienia dla wskaźnika, jakim jest liść podkolbowy, stan wysycenia. Zawartość siarki, a także potasu, sodu i wapnia, a w mniejszym stopniu magnezu wzrastała wraz z masą całkowitą i masą liścia podkolbowego w stadium BBCH 61, sygnalizując niedobór tych składników w roślinie. Predykcja plonu na podstawie zawartości składników pokarmowych w roślinie była możliwa w każdym badanym stadium wegetacji kukurydzy. Jednakże najbardziej wiarygodna (największa wartość R^2 i p) okazała się dla pędu w stadium początku kwitnienia. Składnikami limitującymi plon na obiekcie nienawadnianym był mangan, lecz w istocie rzeczy potas a na nawadnianym azot i miedź.

Kluczowym wskaźnikiem plonu ziarna (PLZ) okazał się azot zakumulowany w ziarniakach ($R^2 \rightarrow 0,66$ i $0,76$, odpowiednio obiekt nienawadniany i nawadniany). Masa azotu w ziarniakach jest funkcją zawartości składnika w ziarnie, lecz zasadniczo zależy od liczba ziarniaków na jednostce powierzchni (LZ) i ich masy (MTZ). Prawidłowość ta została w pełni potwierdzono w trakcie prowadzonych badań.

Predykcja PLZ w początkowym okresie wegetacji (BBCH 14) była istotna dla obu wariantów wodnych, lecz niska i dotyczyła tylko masy azotu zakumulowanego w roślinie (NA_{14}). Istotne związki PLZ z $N_{\min 14}$ i $N_{in 14}$ odnotowano tylko na obiekcie nienawadnianym. Jednakże transformacja zasobów $N_{\min 14}$ z użyciem procedury dla wyznaczenia luki azotowej pozwoliła na wyznaczenie krytycznych zakresów masy N_{\min} w glebie w stadium BBCH 14. Zakres ten był większy dla obiektu naturalnego i mieścił się w przedziale $127 - 145 \text{ kg N ha}^{-1}$. Na obiekcie nawadnianym był mniejszy,

mieszcząc się w zakresie 108 – 122 kg N ha⁻¹. Jednoczenie plon średni, maksymalny dla obu obiektów kształtował się, jak 7,253 i 9,278 t ha⁻¹. Ta specyficzna różnica, w pewnym sensie sprzeczność, wynikała z większej o prawie 50% produktywności N_{min} w stanowisku nawadnianym.

Krytycznym dla wzrostu roślin i formowania struktury plonu ziarna okazał się okres przed kwitnieniem kukurydzy, rozciągającym się od BBCH 14 do BBCH 61. W tym okresie odnotowano istotny spadek masy N_{min} w glebie, a dynamika spadku była wyraźnie większa na obiekcie nawadnianym. Główną formą N_{min}, która podlegała spadkowi był azot azotanowy (N-NO₃). Jednakże predykcyjna wartość N_{min} na początku i końcu tego okresu ujawniła się tylko na obiekcie nienawadnianym. Przed kwitnieniem kukurydzy, głównym wskaźnikiem plonu ziarna, jak i LZ oraz MTZ była masa azotu w systemie gleba/roślina (N_{in61}). Wartość tego zagregowanego wskaźnika wynikała nie tylko z sumy N_{min61} i NA₆₁, lecz także od masy netto azotu uwolnionego z zasobów glebowych (N_{g61}) w omawianym okresie wegetacji kukurydzy. Wartości N_{g61} były zarówno większe na obiekcie deszczowanym, jak i wykazały istotny wzrost w reakcji na system nawożenia siarką (+32% i 45%, odpowiednio dla NPK-S0 i NPK-CaS). Predykcja plonu i elementów struktury plonu była znacznie większa dla roślin prowadzonych w warunkach deszczowania. Jednocześnie na tym obiekcie znaczyła się istotna zależność PLZ, LZ i MTZ od N_{g61}.

Po kwitnieniu, czyli w okresie nalewania ziarna (BBCH 61 – BBCH 89), niezależnie od warunków wodnych prowadzenia doświadczeń, decydującym wskaźnikiem plonu i struktury plonu, była także masa azotu w systemie gleba/roślina (N_{in89}). Na obiekcie nawadnianym wartości wskaźnika były wyraźnie większe w porównaniu do obiektu nienawadnianego. Poziom predykcji plonu ziarna dla w/w wskaźników na obiekcie nawadnianym był na takim samym poziomie (R²), jak dla masy N w ziarnie (NAz). Natomiast masa netto uruchomionego azotu (N_{g89}) była znacznie mniejsza na obiekcie nawadnianym, ulegając redukcji w wariantach z siarką. Zależność ta pośrednio wskazuje mniejszą rolę tej cechy gospodarki azotem po kwitnieniu dla kukurydzy nawadnianej. Na tym obiekcie struktura plonu ziarna została ukształtowana wcześniej, to znaczy przed kwitnieniem. Natomiast w warunkach naturalnych prowadzenia produkcji kukurydzy, zasoby N uruchomione po kwitnieniu, istotnie wpływały na plon, głównie poprzez wzrost MTZ. Jednakże wzrost masy ziarnika nie skompensował mniejszej gęstości ziarniaków, który to czynnik w największym stopniu decydował o plonie ziarna.

6.2. Wnioski

1. Warunki wodne w trakcie wegetacji kukurydzy, istotnie kształtując zasoby azotu w systemie gleba/roślina w krytycznych okresach formowania struktury plonu, określają tym samym plon ziarna.
2. Plon ziarna kukurydzy warunkuje stopień spadku masy N_{\min} w okresie wzrostu wegetatywnego kukurydzy, czyli od stadium początku formowania struktury plonu (BBCH 14) do początku kwitnienia (BBCH 60). Spadek ten jednoznacznie wynika z dynamiki wzrostu masy nadziemnej rośliny i akumulacji azotu.
3. Eksploracja gleby w okresie BBCH 14 do BBCH 61 z N_{\min} przez kukurydżę obejmuje warstwę o miąższości 0-90 cm, aczkolwiek zachodzi tylko w warunkach niedoboru azotu, który w doświadczeniach polowych dotyczy kontroli azotowej.
4. Plon ziarna kukurydzy uprawianej w naturalnych warunkach wodnych (opad naturalny) w decydującym stopniu zależał od masy 1000 ziarniaków, niż liczby ziarniaków na jednostce powierzchni. Uzupełnianie zasobów wodnych gleby poprzez deszczowanie równoważy wpływ obu podstawowych elementów struktury plonu na plon ziarna.
5. Nawadnianie (deszczowanie) jest czynnikiem agrotechnicznym, który uruchamiając zasoby siarki w glebie, niezależnie od formy zastosowanego azotu, istotnie zwiększa zasoby azotu w systemie gleba/roślina, a tym tworzy warunki do formowania struktury kolby.
6. Porównanie wpływu obu nośników siarki na gospodarkę azotową kukurydzy w krytycznych okresach formowania plonu jednoznacznie wskazuje na siarczan wapnia jako optymalną formę siarki, zwłaszcza w naturalnych warunkach opadowych.
7. Siarczanu wapnia istotnie zwiększa plony ziarna kukurydzy uprawianej w naturalnych warunkach wodnych, lecz tylko w zakresie małych dawek azotu.
8. Siarka elementarna istotnie zwiększa plon ziarna kukurydzy, lecz dopiero po uzyskaniu określonego stanu równowagi z zasobami azotu w glebie. Na obiekcie naturalnym równowaga ta została osiągnięta na kombinacji z 200 kg N ha⁻¹ a na nawadnianym po przekroczeniu dawki 120 kg N ha⁻¹.
9. Efekt *rozcieńczenia* azotu odnotowany dla roślin nawadnianych (ziarniaki, pęd) wskazuje na gęstość ziarniaków (liczba ziarniaków na jednostce powierzchni) jako główny determinant gospodarki azotowej kukurydzy, a tym samym plonu ziarna.

10. Predykcijna wartość podstawowych charakterystyk gospodarki azotem (masa N_{\min} w glebie, masa azotu w roślinie) w krytycznych dla formowania/realizacji plonu stadiach, czy fazach rozwoju kukurydzy może być istotna, lecz z reguły jest mała (niska wartość współczynnika determinacji, R^2).
11. Duża wartość predykcijną posiada natomiast wskaźnik zagregowany, jakim jest łączna masa azotu w systemie gleba/roślina (suma: N_{\min} + azot zakumulowany w roślinie + azot uruchomiony z zasobów glebowych w danym okresie wegetacji kukurydzy).
12. Wartość predykcijna plonu ziarna na podstawie zawartości składników pokarmowych w liściu podkolbowym, pomimo istotności, jest mniejsza niż przeprowadzona na podstawie zawartości składników pokarmowych w całym pędzie kukurydzy.
13. Indeks zieloności, SPAD, okazał się wiarygodnym narzędziem predykcji plonu ziarna, niezależnie od wariantu wodnego. Warunki pogodowe, w tym warunki wodne w okresie wegetacji, są jednak istotnym czynnikiem wartości predykcyjnej tego narzędzia diagnostycznego.
14. Zasoby azotu w systemie gleba/roślina w okresie nalewania ziarna w warunkach nawadniania kukurydzy zapewniając optymalne wykształcenie elementów struktury plonu, umożliwiają stabilizację plonu ziarna.

7. Literatura

1. **Aakriti, Maiti, S.; Jain, N.; Malik, J. 2023.** A comprehensive review of flue gas desulphurized gypsum: production, properties and, application. *Constructions and Building materials* 393, 131918.
2. **Abdulaha-Al. Baquy, M.; Li J.-Y.; Mehmood, K.; Shi, R.-Y.; Xu, R.-K., 2017.** Critical pH and exchangeable Al of four acidic soils derived from different parent materials for maize crops. *J. Soils Sediments* 18(2), 1490–1499.
3. **Amissach, S.; Ankomah, G.; Agyei, B.K.; Lee, R.D.; Harris, G.H.; Cabrerea, M.; Feanklin, D.H.; Diaz-Perez, J.C.; Habteselassie, M.Y.; Sintim, H.Y. 2023.** Nutrient sufficiency ranges for corn at the early growth stage: implications for nutrient management. *Plants*, 12, 713.
4. **Asibi, A.M.; Chai, Q.; Coulter, J.A. 2019.** Mechanism of nitrogen use in Maize. *Agronomy* 9, 775.
5. **Barlóg, P.; Łukowiak, R.; Grzebisz, W. 2017.** Predicting the content of soil mineral nitrogen based on the content of calcium chloride-extractable nutrients. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 180, 624–635.
6. **Barlóg, P.; Grzebisz, W.; Łukowiak, R. 2022.** Fertilizers and fertilization strategies mitigating soil factors constraining efficiency of nitrogen in plant production. *Plants* 11, 1855.
7. **Battisti, M.; Moretti, B.; Blandino, M.; Grignani, C.; Zavattato, L. 2023.** Maize response to nitrogen and phosphorus starter fertilisation in mineral-fertilised or manured systems. *The Crop J.* 11(3), 922–933.
8. **Bender, R.R.; Haegele, J.W.; Ruffo, M.L.; Below, F.E. 2013.** Nutrient uptake, partitioning, and remobilization in modern transgenic insect-protected maize hybrids. *Agron J.* 105(1), 161–170.
9. **Benton, J. Jr. 2003.** *Agronomic Handbook Management of Crop, Soils, and Their Fertility.* CDR Press. 26–61.
10. **Beauchamp, E.G.; Kay, B.D.; Pararajasingham, R. 2004.** Soil tests for predicting the N requirement of corn. *Can. J. Soil Sci.* 84, 103–113.
11. **Bavec, F.; Bavec, M. 2022.** Chlorophyll meter readings of winter wheat cultivars and grain yield prediction. *Comm. Plant Soil Anal.* 32, 2709–271.
12. **Borras, L.; Vitantiano-Mazzini, L.N. 2018.** Maize reproductive development and kernel set under limited growth conditions. *J. Exp. Bot.* 69(13), 3235–3243.

13. **Butler, E.E.; Huybers, P. 2015.** Variations in the sensitivity of US maize to extreme temperatures by region and phase. *Environ. Res. Letters* 10, 034009.
14. **Campbell C.R.; Plank C.O. 2000.** Reference sufficiency ranges field crops - corn. In: C.R. Campbell (ed.) Reference sufficiency ranges for plant analysis in the southern region of the United States. Available online at: <http://www.ncagr.gov/agronomi/saaesd/corn.htm>.
15. **Cao, P.; Lu, Ch.; Yu, Z. 2018.** Historical nitrogen fertilizer use in agricultural ecosystems of the contiguous United States during 1850-2015: application rate, timing and fertilizer types. *Earth Syst. Sci. Data*, 10, 969–984.
16. **Chaudhary, S.; Sindhu, S.S.; Dhanker, R.; Kumari, A. 2023.** Microbes-mediated sulphur cycling in soil: impact on soil fertility, crop production and environmental sustainability. *Microb. Res.* 271, 127340.
17. **Chen, L.; Dick, W. A.; Nelson, S. 2005.** Flue gas desulfurization by-products as sulfur sources for alfalfa and soybean. *Agron. J.* 97, 265–271.
18. **Chen, L.; Kost, D.; Dick, W. A. 2008.** Flue gas desulfurization products as sulfur sources for corn. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 72, 1464–1470.
19. **Ciampitti, I.A.; Vyn, T.J. 2013.** Grain nitrogen source changes over time in maize: A review. *Crop Sci.* 53, 366–377.
20. **Ciampitti, I. i in. 2013.** Maize Nutrient Accumulation and Partitioning in Response to Plant Density and Nitrogen Rate: I. Macronutrients. *Agron. J.* 105(3), 783–795.
21. **Czarnecka, M.; Nidzgorska-Lencewicz, J. 2012.** Multiannual variability of seasonal precipitation in Poland. *Water-Environment-Rural Areas.* 2(38), 45–60.
22. **D’Andrea, K.E.; Otegui, M.E.; Cirilo, A.G. 2008.** Kernel number determination differs among maize hybrids in response to nitrogen. *Field Crops Res.* 105(3), 228–239.
23. **DeBruin, J. L., Schussler, J. R., Mo, H., and Cooper, M. 2017.** Grain yield and nitrogen accumulation in maize hybrids released during 1934 to 2013 in the US Midwest. *Crop Sci.* 57, 1431–1446.
24. **DeKok, L.J.; Castro, A.; Durenkamp, M.; Koralewska, A.; Posthumus, F.S.; Stuiver, C.E.E.; Yang, L.; Stulen, I. 2005.** Pathways of plant sulfur uptake and metabolism. – an overview. *Landbauforschung Volkenrode.* 282, 5–13.
25. **Djaman, K.; Irmak, S.; Martin, D.L.; Ferguson, R.B.; Bernards, M.L. 2013.** Plant nutrient uptake and soil nutrient dynamics under full and limited irrigation and rainfed maize production. *Agron. J.* 105, 527–538.

26. **Dontsova, K. Y. B.; Lee B.; K. Slater, J. M. Bigham. 2005.** Gypsum for Agricultural Use in Ohio—Sources and Quality of Available Products. Ohio State University Extension Fact Sheet ANR-20-05.
27. **Dubas, A. 2004.** Technologia produkcji kukurydzy. Wieś Jutra, Warszawa. 7–65 s.
28. **Dudek, S.; Żarski, J.; Kuśmierk-Tomaszewska, R. 2009.** Reakcja kukurydzy na nawadnianie w świetle wyników wieloletniego eksperymentu polowego. Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich 3, 167–174.
29. **Dwyer LM, Tollenaar M, Houwing L. 1991.** A nondestructive method to monitor leaf greenness in corn. *Can J Plant Sci.* 71, 505–509.
30. **Erenstein, O.; Jaleta, M.; Mottaleb, K.; Prasanna, B.M. 2022.** Global maize production, consumption and trade: trends and R&D implications. *Food Security* 14, 1295–1319.
31. **Eriksen, J.; Murphy, M.D.; Schnug, E. 1998.** The soil sulphur cycle. W: (red. Schnug, E.). *Sulphur in agroecosystems.* Dordrecht, Kluwer Acad. Pub. 39–74 s.
32. **Eriksen, J. 2003.** Organic manures as sources of fertilizer sulphur. *Nawozy I Nawożenie* 3(16), 52–70.
33. **European Commission Eurostat 2013.** Methodology and Handbook Eurostat/OECD. Nutrient Budgets EU-27, Norway, Switzerland. Documet Version 1.02 dated 0/4/03/2013, 112 s.
34. **Fan, M.-S.; Zhao, F.-J.; Fairweather-tait, S.; Poulton, P.; Dunham, S.; McGrath, S. 2008.** Evidence of decreasing mineral density in wheat grain over the last 160 years. *J. Trace Elements Med. Biol.* 22, 315–324.
35. **Fang, J.; Su, Y. 2019.** Effects of soils and irrigation volume on maize yield, irrigation water productivity, and nitrogen uptake. *Scientific Reports* 9, 7740.
36. **Favaretto, N.; L. D., Norton; B. C., Joern; S. M., Brouder. 2006.** Gypsum amendment and exchangeable calcium and magnesium affecting phosphorus and nitrogen in runoff. *Soil Science Society of America Journal* 70, 1788–1796.
37. **Fernandez, J. A.; DeBruin, J.; Messina, C. D.; Ciampitti, I. A. 2020.** Late-season nitrogen fertilization on maize yield: A meta-analysis. *Field Crops Research*, 247, 107586.
38. **Fernandez, J.A.; Messina, C.D.; Rotundo, J.L.; Ciampitti, I.A. 2021.** Integrating nitrogen and water-soluble carbohydrates dynamics in maize: a comparison of hybrids from different decades. *Crop Sci.* 61, 1360–1373.

- 39. Filipek-Mazur, B.; Lepiarczyk, A.; Tabak, M. 2013.** Wpływ nawożenia azotem i siarką na plonowanie oraz skład chemiczny ziarna kukurydzy. Część II. Zawartość azotu i siarki. *Fragm. Agron.* 30(4), 29–35.
- 40. Fotyma, M.; Gosek S. 2000.** Zmiany w zużyciu nawozów potasowych i ich konsekwencje dla żyzności gleby i poziomu produkcji roślinnej w Polsce. *Nawozy i Nawożenie* 2, 1–55.
- 41. Fotyma, E. 2003.** Wpływ nawożenia siarką na wykorzystanie azotu z nawozów mineralnych przez rośliny uprawy polowej. *Nawozy i Nawożenie* 4(17), 117–136.
- 42. Giehl, R.F.H.; von Wirén, N. 2014.** Root nutrient foraging. *Plant Physiol.* 166, 509–517.
- 43. Glass, A.D.M. 2003.** Nitrogen use efficiency of crop plants: Physiological constraints upon nitrogen absorption. *Crit. Rev. Plant Sci.* 22, 453–470.
- 44. Gołębiowska, M.; Wróbel, E. 2009.** Wpływ nawożenia azotem na plonowanie kukurydzy. *Biuletyn IHAR* 251, 121–136.
- 45. Gonzalez, V. H., Lee, E. A., Lukens, L. L., and Swanton, C. J. 2019.** The relationship between floret number and plant dry matter accumulation varies with early season stress in maize (*Zea mays* L.). *Field Crop. Res.* 238, 129–138.
- 46. Górny, A.G. 2005.** *Zarys genetyki zbóż. Tom 2, Instytut Genetyki Roślin PAN. Poznań.*
- 47. Grzebisz, W.; Wrońska, M.; Diatta, J.B.; Szczepaniak, W. 2008.** Effect of zinc application at early stages of maize growth on the patterns of nutrients and dry matter accumulation by canopy. Part I. Zinc uptake patterns and its redistribution among maize organs. *J. Elem.* 13(1), 17–28.
- 48. Grzebisz, W. 2009.** *Nawożenie roślin uprawnych, Państwowe Wydawnictwo Rolnicze i Leśnie, Tom 2. 376 s.*
- 49. Grzebisz, W.; Barłóg, P.; Szczepaniak, W.; Potarzycki, J. 2010.** Effect of potassium fertilizing system on dynamics of dry matter accumulation by maize. *Fertil. Fert.* 40, 57–69.
- 50. Grzebisz, W.; Baer, A.; Barłóg, P.; Szczepaniak, W.; Potarzycki, J. 2010a.** Effect of nitrogen and potassium fertilizing systems on maize grain yield. *Fertilizers Fertilization.* 40, 45–56.
- 51. Grzebisz, W.; Przygocka-Cyna, K.; Szczepaniak, W.; Diatta, J.B.; Potarzycki, J. 2010b.** Magnesium as a nutritional tool of nitrogen efficient management - plant production and environment. *J. Elementol.* 15(4), 771–778

- 52. Grzebisz, W. 2012.** Technologie nawożenia roślin uprawnych- fizjologia plonowania, Tom 2. Zboża i kukurydza, Powszechne Wydawnictwo Rolnicze i Leśne.
- 53. Grzebisz, W.; Diatta, J. 2012.** Constrains and solutions to maintain soil productivity, a case study from Central Europe. In Soil Fertility Improvement and Integrated Nutrient Management—A Global Perspective, Whalen J., Ed.; InTech: London, UK, s. 159—183.
- 54. Grzebisz, W. 2013.** Crop response to magnesium fertilization as affected by nitrogen supply. *Plant Soil*. 368, 23—39.
- 55. Grzebisz, W. 2015.** Nawożenie roślin uprawnych, Podstawy nawożenia T.1, Powszechne Wydawnictwo Rolnicze i Leśne. 428 s.
- 56. Grzebisz, W.; Łukowiak, R.; Sassenrath, G. 2018.** Virtual nitrogen as a tool for assessment of nitrogen at the field scale. *Field Crops Res*. 218, 182—184.
- 57. Grzebisz, W.; Łukowiak, R. 2021.** Nitrogen gap amelioration is a core for sustainable intensification of agriculture – A concept. *Agronomy* 11(3), 419.
- 58. Grzebisz, W.; Diatta, J.; Barłóg, P.; Biber, M.; Potarzycki, J.; Łukowiak, R.; Przygocka-Cyna, K.; Szczepaniak, W. 2022.** Soil Fertility Clock—Crop Rotation as a Paradigm in Nitrogen Fertilizer Productivity Control. *Plants*. 11, 2841.
- 59. Grzebisz, W.; Zielewicz, W.; Przygocka-Cyna, K. 2023.** Deficiencies of secondary nutrients in crop plants—A real challenge to improve nitrogen management. *Agronomy* 13, 66.
- 60. Grzebisz, W.; Niewiadomska, A.; Potarzycki, J.; Andrzejewska, A. 2024.** Phosphorus hotspots in crop plants production on the farm – mitigating critical factors. *Agronomy* 14, 200.
- 61. Guo, S; Chen, Y.; Che, X. i in. 2010.** Grain mineral accumulation changes in Chinese maize cultivars released in different decades and the response to nitrogen fertilizers. *Front. Plant Sci*. 10, 1662.
- 62. GUS.** Produkcja upraw rolniczych i ogrodnich w latach 2014-2021. GUS.
- 63. Halvorson, A.D.; Bartolo, M.E. 2014.** Nitrogen source and rate effects on irrigated corn yields and nitrogen-use efficiency. *Agron. J*. 106, 681—693.
- 64. Hammad, H.M.; Farhad, W.; Abbas, F.; Fahad, S.; Saeed, S.; Nasim, W.; Bakhat, H.F. 2017.** Maize plant nitrogen uptake dynamics at limited irrigation water and nitrogen. *Environ. Sci. Pollut. Res*. 24, 2549—2557.

- 65. Heckman, J.R.; Sims, J.T.; Beegle, D.B.; Coale, F.J.; Herbert, S.J.; Bruulsema, T.W.; Bamka, W.J. 2003.** Nutrient removal by corn grain harvest. *Agron. J.* 95, 587–591.
- 66. Hisse, I. R., D’Andrea, K. E., and Otegui, M. E. 2019.** Source-sink relations and kernel weight in maize inbred lines and hybrids: responses to contrasting nitrogen supply levels. *Field Crop. Res.* 230, 151–159.
- 67. Hołubowicz-Kliza, G. 2006.** Wapnowanie gleb w Polsce. Instrukcja Upowszechnieniowa 128, IUNG-PIB, Puławy, 61 s.
- 68. Houba, V.J.G.; Temminghoff, E.J.M.; Gaikhorst, G.A.; van Vark W. 2000.** Soil analysis procedures using 0.01 M calcium chloride as extraction reagents. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 31, 1299–1396.
- 69. Husa, T. E.; Ruiz Diaz, D. A. 2020.** Fertilizer Source and Rate Affect Sulfur Uptake and Yield Response in Corn. *Kansas Agricultural Experiment Station Research Reports Vol. 6(9)*, s. 6.
- 70. Husa, T. E.; Ruiz Diaz, D. A. 2021.** Corn Yield Response to Sulfur Applied with Nitrogen Fertilizer. *Kansas Agricultural Experiment Station Research Reports Vol. 7(8)*, s. 4.
- 71. Hütsch, B. W., & Schubert, S.(2017).** Harvest index of maize (*Zea mays* L.): Are there possibilities for improvement? *Advances in Agronomy*, 146, 37–82.
- 72. Ibrikli, H.; Koca, Y.K.; Cetin, M.; Karbez, E.; Koca, G.B.; Sagir, H.; Ryan, J.; Islam, K.R. 2018.** Considering residual soil mineral nitrogen in corn fertilizer recommendations in irrigated Mediterranean Area. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.* 49(2), 2020–214.
- 73. Irmak, S.; Mohammed, A.T.; Drudik, M. 2023.** Maize nitrogen uptake, grain nitrogen concentration and root zone residual nitrate response under center pivot, subsurface drip and Surface (furrow) irrigation. *Agric. Water Manag.* 287, 108421
- 74. Jamal, A.; Moon, Y-S.; Abdin, M.Z. 2010.** Sulphur – a general overview and interaction with nitrogen. *Aust. J. Crop Sci.* 4(7), 523–529.
- 75. Jean, F.C.; Weaver, J.E. 1924.** Root behavior and crop yield under irrigation. *Carnegie Institution of Washington*, No. 357, Judd & Detweiler, INC, Washington, D.C., s. 78.
- 76. Jones, J.B.; Eck, H.V.; Voss, R. 1990.** Plant analysis as an aid in fertilizing corn and grain sorghum. In: *Soil testing and plant analysis*. R.L. Westerman, (ed.) 3rd *Soil Sci. Soc. Am. J., Book Ser. 3*, Medison, WI: 521–527.

- 77. Kabala, C.; Charzyński, P.; Chodorowski, J.; Drewnik, M.; Głina B.; Greinert, A.; Hulisz, P.; Jaknkowski, M.; Jonczak, J.; Łabaz, B.; i in., 2019.** Polish Soil Classification: Principles, classification scheme and correlation. *Soil Sci. Ann.* 70, 2, 71–97.
- 78. Kaczmarczyk, S.; Nowak, L., 2006.** Nawadnianie roślin. Państwowe Wydawnictwo Rolnicze i Leśne. 479 s.
- 79. Kairies, C.L.; K.T., Schroeber; C.R., Cardone. 2006.** Mercury in gypsum produced from flue gas desulfurization. *Fuel* 85:2530–2536.
- 80. Kaur, A.; Bedi, S. 2012.** Nitrogen use Efficiency and Source-sink Relations in Maize. *J. Plant Sci. Res.* 28, 219, (5.3.3)
- 81. Kaur, J.; Chatterjee, Franzen, D.; Cihacek, L. 2019.** Corn response to sulfur fertilizer in the Red River Valley. *Agron. J.* 111(5), 1–9.
- 82. Kertesz, M.A.; Mirleau, P. 2004.** The role of soil microbes in plant sulphur nutrition. *J. Exper. Bot.* 55, 1939–1945.
- 83. Kęsik, K. 2016.** Application of the Mehlich 3 method in the fertilizer advisory system. *Studia i Raporty IUNG-PIB* 48, 2, 95–104. (in Polish).
- 84. Klikocka, H.; Marks, M. 2018.** Sulphur and nitrogen fertilization as a potential means of agronomic biofortification to improve the content and uptake of microelements in spring wheat grain DM. *J. Chem.* 12 s.
- 85. Körner, Ch. 2015.** Paradigm shift in plant growth control. *Curr. Opin. Plant Biol.* 25, 107–114.
- 86. Kost, D.; L. Chen; X. Guo; Y. Tian; K. Ladwig; W.A. Dick. 2014.** Effects of flue gas desulfurization and mined gypsums on soil properties and on hay and corn growth in Eastern Ohio. *J. Environ. Qual.* 43(1), 312–321.
- 87. Kovács, P.; Vyn, T.J. 2017.** Relationships between ear-leaf nutrient concentrations at silking and corn biomass and grain yield at maturity. *Agron. J.* 109(6), 2898–2906.
- 88. Krasuski, S. 2017.** Uprawa oraz nawożenie kukurydzy w rodzinnym gospodarstwie rolnym. W: *Nauki rolnicze i przyrodnicze – wybrane zagadnienia.* (red. Szala, M.; Maciąg, K). 42–51, Lublin.
- 89. Król, A.; Księżak, J.; Kubińska, E.; Rozakis, S. 2018.** Evaluation of Sustainability of Maize Cultivation in Poland. A Prospect Theory—Promethee Approach. *Sustainability.* 10, 4263.

- 90. Książak, J.; Bojarszczuk, J.; Staniak, M. 2012.** Produkcyjność kukurydzy i sorga w zależności od poziomu nawożenia azotem. *Polisj J. Agron.* 8, 20–28.
- 91. Książak, J.; Staniak, M.; Bojarszczuk, J., 2015.** Uprawa kukurydzy w systemie ekologicznym. IUNG-PIB Puławy. 28 s.
- 92. Kuchar, L.; Szwejkowski, Z.; Rychcik, B.; Dragońska, E.; Cymes I. 2021.** Regional climate changes in North-Eastern Poland and their impact on maize crops. *Acta Sci. Pol. Formatio Circumiectus.* 20(1), 3–18.
- 93. Kulczycki, G. 2021.** The effect of elemental sulfur fertilization on plant yields and soil properties. *Adv. Agron.* 167, 105–182.
- 94. Kumar, P.; Singh, P. 2009.** Effect of copper on growth, yield and concentration of Fe, Mn, Zn and Cu in wheat plants (*Triticum aestivum* L.). *Journal of Environmental Biology* 30(4): 485–488.
- 95. Kurtyka, R.; Burdach, Z.; Karcz, W. 2011.** Temperature dependence of growth in maize seedlings and excised coleptyle segments. *Polish J. Environ. Studies.* 20(5), 1221–1225.
- 96. Kuś J., 2016.** Gospodarowanie wodą w rolnictwie. *Studia i raporty IUNG-PIB* 4791), 83–104.
- 97. Lebedev, A.L. 2015.** Kinetics of gypsum dissolution in water. *Geochemistry Inter.* 53(9), 811–824.
- 98. Lejeune, P.; Bernier, G. 1996.** Effect of environment on the early steps of ear initiation in maize (*Zea mays* L.). *Plant Cell Environ.* 19, 217–224.
- 99. Lepiarczyk A., Filipek-Mazur B., Joniec A., Tabak M. 2013.** Wpływ nawożenia azotem i siarką na plonowanie i skład chemiczny ziarna kukurydzy. Część I. Wielkość i komponenty plonu ziarna kukurydzy. *Fragm. Agron.* 30(3), 115–122
- 100. Lipiński, W. 2019.** Agrochemiczne właściwości gleb użytkowanych rolniczo. *Inżynieria Ekologiczna.* 1–12.
- 101. Liu, Z.; Zhu, K.; Dong, S.; Liu, P.; Zhao, B.; Zhang, J. 2017.** Effects of integrated agronomic practices management on root growth and development of summer maize. *Europ. J. Agron.* 84, 140–151.
- 102. Lucheta, A.R.; Lambais, M.R. 2012.** Sulfur in agriculture. *R. Bras. Ciencia Solo.* 36, 1369–1379.

103. **Losak, T., Hlusek, J., Martinec, J., Jandak, J., Szostkova, M., Filipcik, R., et al. 2011.** Nitrogen fertilization does not affect micronutrient uptake in grain maize (*Zea mays* L.). *Acta Agric. Scand. Sect. B-Soil Plant Sci.* 61, 543–550.
104. **Lynch, J.P. 2013.** Steep, cheap and deep: an ideotype to optimize water and N acquisition by maize root systems. *Annals Bot.* 112, 347–357
105. **Maddoni, G.A.; Otegui, M.E.; Bonhomme, R. 1998.** Grain yield components in maize: II. Postsilking growth and kernel weight. *Field crops res.* 56(3), 257–264.
106. **Maddoni, G.A.; Otegui, M.E.; Cirilo, A.G., 2001.** Plant population density, row spacing and hybrid effects on maize canopy architecture and light attenuation. *Field Crop. Res.* 71, 183–193.
107. **Mahal, N. K.; Sawyer, J.E.; Iqbal, J.; Sassman, A.M.; Mathur, R.; Castellano, M.J. 2022.** Role of sulfur mineralization and fertilizer source in corn and soybean production systems. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 86, 1058–1071.
108. **Mańkowski, D.R. 2017.** Nowości w Statistica wspierające planowanie badań i analizę ich wyników w naukach przyrodniczych. infor@DaneWiedzaSukces.pl; <https://www.statsoft.pl>
109. **Marschner, P. 2012.** Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants, 3rd ed; Elsevier Ltd.: London, UK. 649 s.
110. **Maziarek, A.; Krawczyk, A., 2015.** Gleba jako środowisko odżywcze roślin. Opolski Ośrodek Doradztwa Rolniczego, Łosiów. 59 s.
111. **Mehlich, A. 1984.** Mehlich 3 soil test extractant: a modification of Mehlich 2 extractant. *Com. Soil Sci. Plant Anal.* 15, 1409–1416.
112. **Mercik, S. 2004.** Chemia rolna. SGGW Warszawa. 287 s.
113. **Michalski, T., 2009.** Kukurydza nowe perspektywy, Wyd. Biznes Press Sp. z.o.o. s. 39–41.
114. **Monitoring Chemizmu Gleb Uprawnych, Raport. 2017.** IUNG-PIB wejście 20.03.2023.
115. **Mullins, G., 2009.** Phosphorus, Agriculture & the Environment. Virginia Cooperative Extension. 16 s.
116. **Nasielski, J.; Earl, H.; Deen, B. 2019.** Luxury vegetative nitrogen uptake in maize buffers grain yield under post-silking water and nitrogen stress: a mechanistic understanding. *Front. Plant Sci.* 10, 318.
117. **National Research Council 2001.** Nutrient requirements of dairy cattle. National Academic Press, Washington DC, USA.

- 118. Nielsen, D.C.; Halvorson, A.D.; Vigil, M.F. 2010.** Critical precipitation period for dryland maize production. *Field Crops Research*. 118, 259–263.
- 119. Ning, P.; Fritschi, F.B.; Li, Ch. 2017.** Temporal dynamics of post-silking N fluxes and their effects on grain yield in maize under low to high N inputs. *Field Crops Res.* 204, 249–259.
- 120. Norton, L. D.; F. Rhoton. 2007.** FGD Gypsum Influences on Soil Surface Sealing, Crusting, Infiltration and Runoff. Presented at the workshop on Agricultural and Industrial Uses of FGD Gypsum. October. Atlanta, Ga. www.soilsolution.net
- 121. Novák, V.; Vidovič, J. 2003.** Transpiration and nutrient uptake dynamics in maize (*Zea mays* L.). *Ecol. Modelling*. 166(1-2), 99–107.
- 122. Nuss, E.T.; Tanumihardjo, S.A. 2010.** Maize: a paramount staple crop the context of global nutrition. *Comprehensive Rev. Food Sci. Safety* 9, 417–436.
- 123. Ochal, P., 2015.** Aktualny stan i zmiany żyzności gleb w Polsce. *Studia i Raporty IUNG-PIB* 45(19), 9-25.
- 124. Ochal, P.; Smreczak, B. 2020.** Zakwaszenie gleb i aktualne zagadnienia wapnowania. *Studia i Raporty IUNG-PIB* 63 (17), 9–19.
- 125. Otegui, M.E.; Bonhomme, R. 1998.** Grain components in maize: I. Ear growth and kernel set. *Field Crops Res.* 56(3), 247–256.
- 126. Osterholz, W.R.; Oshri, R.; Liebman, M.; Castellano, M.J. 2017.** Can mineralization of soil organic nitrogen meet maize nitrogen demand? *Plant Soil*. 415, 1-2, 73–84.
- 127. Pagani, A.; Echeverría, H.E.; Andrade, F.H.; Sainz Rozas, H.R. 2012.** Effects of nitrogen and sulfur application on grain yield, nutrient accumulation, and harvest indexes in maize. *J. Plant Nutr.* 37(7), 1080–1097.
- 128. Peng, Y.F.; Niu, J.F.; Peng, Z.P.; Zhang, F.S.; Li, C.J. 2010.** Shoot growth potential drives N uptake in maize plants and correlates with root growth in the soil. *Field Crops Res.* 115, 85–93
- 129. Peng, Y.; Peng, Y.; Li, X.; Li, Ch. 2013.** Determination of the critical soil mineral nitrogen concentration for maximizing maize grain yield. *Plant Soil* 372, 41–51.
- 130. Piecuch, K. 2022.** Kukurydza. centralny Ośrodek Badania Odmian Roślin uprawnych. COBO 121/2022, Słupia Wielka. 10 s.

131. **Piecuch, K. 2023.** Lista opisowa odmian roślin rolniczych. Kukurydza. COBORU 59/2023, Słupia Wielka, 52 s.
132. **Pikuła, D. 2014.** Nawożenie kukurydzy uprawianej na ziarno. *Studia i Raporty IUNG-PIB* 7(11), 99–109.
133. **PN-EN ISO 20483:2014-02. 2015.** Cereal grains and pulses – determination of nitrogen content and conversion to crude protein – Kjeldah method. PKN 2015, Warsaw, 24 s.
134. **Podleśna, A. 2002.** Air pollution by sulfur dioxide in Poland – impact on agriculture. *Phyton*. 42(3):157–163.
135. **Podleśna, A. 2010.** Perspektywy nawożenia roślin siarką. *Studia I Raporty IUNG-PIB* 25, 31–42.
136. **Podleśna, A. 2013.** Potrzeby nawożenia siarką – stan obecny i perspektywy. *Studia i Raporty IUNG-PIB* 34(8), 107–120.
137. **Podleśna, A.; Podleśny, J.; Klikocka, H. 2017.** Wpływ nawożenia siarką i azotem na azotowo-fosforową gospodarkę kukurydzy. *Przemysł Chemiczny* 1(6): 188–191.
138. **Potarzycki, J. 2003.** Fosfor w glebie. *J. Elementol.* 8(3) Suppl., 19–32.
139. **Potarzycki, J.; Grzebisz, W., 2009.** Effect of zinc foliar application on grain yield of maize and its yielding components. *Plant Soil, Environ.* 55(12), 519–527.
140. **Potarzycki, J. 2010.** Improving nitrogen use efficiency of maize by better fertilizing practices. *Nawozy i Nawożenie* 39, 5–29.
141. **Potarzycki, J.; Wendel J. 2023.** The effect of sulfur carriers on nitrogen use efficiency in potatoes – a case study. *Agronomy* 13, 2470.
142. **Przygocka-Cyna, K.; Grzebisz, W. 2017.** Sulphur balance in Poland – regional Analysis. *Fragm. Agron.* 3491, 60–75.
143. **Ptaszyńska, G.; Sulewska, H. 2008.** Zmienność plonowania mieszańców kukurydzy o różnej wczesności w warunkach klimatycznych Środkowej Wielkopolski. *Acta. Sci. Pol. Agricultura.* 7(3), 93–103.
144. **Racjan, I.; Tollenaar, M. 1999.** Source-sink ratio and leaf senescence in maize II. Nitrogen metabolism during grain filling. *Field Crop. Res.* 60, 255–265.
145. **Ransom, C.J. Kitchen, N.R.; Camberato, J.J.; carter, P.R.; Ferguson, R.B.; Fernandez, F.G.; Franzen, D.W.; Laboski, C.A.M.; Nafziger, E.D.; Sawyer, J.E.; Scharf, P.C.; Shanahan, J.F. 2020.** Corn nitrogen rate recommendation

- tools' performance accros eight US midwest corn belt states. *Agron. J.* 112, 470–492.
146. **Ranun, P.; Pena-Rosas, J.P.; Garcia-casal, M.N. 2014.** Global maize production, utilization, and consumption. *Ann. N.Y. Acad. Sci.* 1312, 105–112.
 147. **Rausch, T.; Wachter, A. 2005.** Sulfur metabolism : a versatile platform for launching defence operations. *Trends Plant Sci*, 10, 503–509.
 148. **Riedell, W. E. 2010.** Mineral-nutrient synergism and dilution responses to nitrogen fertilizer in field-grown maize. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 173, 869–874.
 149. **Rocznik Statystyczny Rolnictwa 2022.** GUS. Warszawa. 440 s.
 150. **Rostami, R.; Koocheki, A.R.; Mahallati, M.N.; Kafi, M. 2008.** Evaluation of chlorophyll meter (SPAD) data for prediction of nitrogen status in corn (*Zea mays* L.). *Am.Eur. J. Agric & Environ. Sci.* 39(1), 79–85.
 151. **Ruiz, A.; Trifunovic, S.; Eudy, D.M. i in. 2023.** Harvest index has increased over the last 50 years of maize breeding. *Field Crops Res.* 300, 108991.
 152. **Rutkowska, A. 2014.** Racjonalne i efektywne nawożenie azotem. *Studia i Raporty IUNG-PIB* 37(11), 33–46.
 153. **Rutkowska, A. 2015.** Produkcyjne I środowiskowe skutki wieloletniego wyczerpania gleb z fosforu i potasu. *Studia i Raporty IUNG-PIB* 45(19), 55–67
 154. **Scherer, H.W. 2001.** Sulphur in crop production – invited paper. *Europ. J. Agron.* 14, 81–111.
 155. **Schlegel, A.J.; Havlin, J.L. 2017.** Corn yield and grain nutrient uptake from 50 years of nitrogen and phosphorus fertilization. *Agron. J.* 109, 335–342.
 156. **Schulte, E.E.; Kelling, K.A. 1991.** Plant Analysis: a Diagnostic Tool. University of Wisconsin-Madison. NCH-46 Crop Fertilization. RR 4/91. Available online at: <https://www.extension.purdue.edu/extmedia/nch/nch-46.html> (Verified 2017.11.07).
 157. **Scott, M.P.; Emery, M. 2016.** Maize: Overview. Reference Module in Food Science. *PNAS* 97, 7008–7015.
 158. **Shainberg, I.; Summer, M.E.; Miller, W.P.; Farina, M.P.; Pavan, M.A.; Fey, M.V. 1989.** Use of gypsum on soils: a review. *Adv. Soil Sci.* 9, 111 s.
 159. **Sharpley, A.N. 1995.** Soil phosphorus dynamics: agronomic and environmental impacts. *Ecol. Engin.* 5, 261–279.

- 160. Simic, D.; Zdunic, Z.; Jambrovic, A.; Ledencan, T.; Brkic, I.; Duvnjak, V. i in.. 2009.** Relations among six micronutrients in grain determined in a maize population. *Poljoprivreda (Agric.)* 15, 15–19.
- 161. Singh, R.; Kyle Sawatzky, S.; Thomas, M.; Skin, S.; Zhang, H.; Raun, W.; Arnall, D.B. 2023.** Nitrogen, phosphorus, and potassium uptake in rain-fed corn as affected by NPK fertilization. *Agronomy* 13, 1913.
- 162. Smith, D.B.; W.F., Cannon; L.G. Woodruff; F., Solano; J.E. Kilburn; D.L. Fey. 2013.** Geochemical and mineralogical data for soils of the conterminous United States. U.S. Geological Survey Data Series 801, 19 s., <https://pubs.usgs.gov/ds/801/>.
- 163. Sobkowiak, A.; Szczepaniak, J.; Sowiński, P. 2013.** Molekularne podłoże udomowienia kukurydzy. *Biuletyn IHAR* 276, 41–55.
- 164. Soltanpour P.N.; Malakouti M.J.; Ronaghi A. 1995.** Comparison of diagnosis and recommendation integrated system and nutrient sufficiency range for corn. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 59, 133–139.
- 165. Srivastava, R.K.; Jozewicz, W. 2001.** Flue gas desulfurization: The state of the art. *J. Air Waste Manage. Assoc.* 51, 1676–1688.
- 166. Subedi, K.; Ma, B.; 2005.** Nitrogen uptake and partitioning in stay-green and leafy maize hybrids. *Crop Sci.* 45: 740–747.
- 167. Sulewska, H., 2004.** Wymagania środowiskowe kukurydzy i możliwości jej uprawy w Polsce. W: (red. Dubas A.) *Technologia produkcji kukurydzy*. Wieś Jutra, Warszawa. 16–23.
- 168. Summer, M. 2009.** Gypsum improves subsoil roots growth. International Symposium “Root Research and Applications” RootRAP, 2–4 September Boku–Vienna, Austria.
- 169. Sutar, R.K.; Pujar, A.M.; Aravinda Kumar, B.N.; Hebsur, N.S. 2017.** Sulphur Nutrition in Maize - A Critical Review. *Int. J. Pure App. Biosci.* 5 (6), 1582–1596.
- 170. Swify, S.; Avizienyte, D.; Nazeika, R.; Braziene, Z. 2022.** Comparative study effect of urea-sulfur fertilizers on nitrogen uptake and maize productivity. *Plants* 11, 3020.

- 171. Szczepaniak, W.; Grzebisz, W.; Potarzycki, J. 2014.** An assessment of the effect of potassium fertilizing systems on maize nutritional status in critical stages of growth by plant analysis. *J. Elem.* 538–548
- 172. Szmigiel, A.; Kołodziejczak, M.; Oleksy, A., 2006.** Wpływ nawożenia organicznego i mineralnego na plon ziarna kukurydzy. *Fragm. Agron.* 23(3), 70–79.
- 173. Szulc, P.; Waligóra, H. 2010.** Response of maize hybrid (*Zea mays* L.), stay-green type to fertilization with nitrogen, sulphur and magnesium. Part. II. Plant development and uptake of mineral components. *Acta Sci. Pol. Agric.* 9, 41–54
- 174. Szulc, P.; Bocianowski, J.; Kruczek, A.; Szymańska, G.; Roszkiewicz, R. 2013.** Response of two cultivar types of maize (*Zea mays* L.) expressed in protein content and its yield varied soil resources of N and Mg and a form of nitrogen fertilizer. *Pol. J. Environ. Stud.* 22(6), 1845–1853.
- 175. Szulc, P.; Ambroży-Deręgowska, K.; Mejza, I.; Kobus-Cisowska, J.; Ligaj, M.; Krauklis, D. 2020.** The Role of Agrotechnical Factors in Shaping the Health of Maize Plants (*Zea mays* L.) *Pol. J. Environ. Stud.* Vol. 30, No. 1 (2021), 863–869.
- 176. Szulc, P.; Barłów, P.; Ambroży-Deręgowska, K.; Mejza, I.; Kobus-Cisowska, J. 2020.** In-soil application of NP mineral fertilizer as a method of improving nitrogen yielding efficiency. *Agronomy* 10(1), 1488.
- 177. Szulc, P.; Baldys, W.; Kobus-Cisowska, J.; Krauklis, D.; Kucharska, A. 2021.** Assessment of the impact of selected agriculture factors on maize nutritional status in critical growth stages using the plant analysis method. Part I. 5-6 leaf stage (BBCH 15/16). *J. Res. Appl. Agric. Eng.* 66(1), 10–18.
- 178. Sylvester-Bradley, R.; Lunn, G.; Foulkes, J.; Shearman, V.; Spink, J.; Ingram, J. 2000.** Management Strategies for Yield of Cereals and Oilseed Rape. HGCA Conference: Agronomic Intelligence: The Basis for Profitable Production. HGCA, 18. Available online: www.hgca.com/publications (accessed on 14 May 2022).
- 179. Thor, K. 2019.** Calcium—Nutrient and messenger. *Front. Plant Sci.* 10, 440.
- 180. Tollenaar, M.; Lee, E. 2002.** Yield potential, yield stability and stress tolerance in maize. *Field Crops Res.* 75, 161–169.
- 181. Trávník, K.; Zbiral, J.; Němec, P. 1999.** Agrochemical soil testing – Mehlich III. Brno, Central Institute for Supervising and Testing in Agriculture. (In Czech).
- 182. Trętowski J.; Wójcik, R. 1988.** Doświadczalnictwo rolnicze. WSRP Siedlce

- 183. USGS. 2013.** Minerals commodity summaries. <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/gypsum/mcs-2013-gypsum.pdf> (13.02.2023.)
- 184. Wang, Y.; Mi, G.H.; Chen, F.J.; Zhang, J.H.; Zhang, F.S. 2004.** Response of root morphology to nitrate supply and its contribution to nitrogen accumulation in maize. *J. Plant Nutr.* 27, 2189–2202.
- 185. Wang, N.; Wang, E.; Wang, J.; Zhang, J.; Zheng, B.; Huang, Y.; Tan, M. 2018.** Modelling maize phenology, biomass growth and yield under contrasting temperature conditions. *Agric. Forest Meteorol.* 250-252, 319–329.
- 186. Watts, D.B.; Torbert, H.A. 2009.** Impact of gypsum applied to grass buffer strips on reducing soluble P in surface water runoff. *J. Environ. Qual.* 38:1511–1517.
- 187. Watts, D.B.; Dick, W.A. 2014.** Sustainable use of FGD gypsum in agricultural systems: introduction. *J. Environ. Qual.* 42, 246–252.
- 188. Weidner, S. 2015.** Wykorzystanie analiz proteomicznych do wyjaśnienia biologicznych podstaw tolerancji stresów u roślin, *Acta Scientiarum Polonorum Biotechnologia* 14 (2), 2015, str. 43–56.
- 189. White, P.J.; Broadley, M.R. 2003.** Calcium in plants. *Ann Bot-London.* 92, 487–511.
- 190. White, Ph.J. Calcium. 2015.** In: *Handbook of Plant Nutrition.* 2nd Edition. Barker, A.V.; Pilbeam, D.J. (eds.) CRC Press, Taylor and Francis group, Boca Raton. 165–198.
- 191. Wicki, L. 2008.** Wykorzystanie postępu odmianowego w produkcji zbóż w polskim rolnictwie. *Roczniki Nauk Rolniczych seria G* 942 (2), 136–146.
- 192. Wicki, L. 2010.** Efekty upowszechniania postępu biologicznego w produkcji roślinnej. *Rozprawy Naukowe i Monografie SGGW* 378, 183 s. Wydawnictwo SGGW, Warszawa.
- 193. Worku, M.; Bänziger, M.; Friesen, D.; Horst, W.J. 2007.** Nitrogen uptake and utilization in contrasting nitrogen efficient tropical maize hybrids. *Crop Sci.* 47, 519–528.
- 194. Wortmann, Ch.S.; Dobermann, A.R.; Ferguson, R.B.; Hergert, G.H.; Shapiro, Ch.A. 2009.** High-yielding corn response to applied phosphorus, potassium and sulfur in Nebraska. *Agronomy J.* 101, 546–555.

195. **Viero, F.; Menegati, G.B.; Carniel E.; Silva P.R.F.; Bayer C. 2017.** Urease Inhibitor and Irrigation Management to Mitigate Ammonia Volatilization from Urea in No-Till Corn. *Rev. Bras. Ciencia Solo* 41, e160567.
196. **Zbiral J. 2016.** Determination of plant-available micronutrients by the Mehlich 3 soil extractant - a proposal of critical values. *Plant Soil Environ.* 62(11), 527–531.
197. **Zhang, Y., E. Kendy, Y. Qiang, L. Changming, S. Yanjun, and S. Hongyong. 2004.** Effect of soil water deficit on evapotranspiration, crop yield, and water use efficiency in the North China plain. *Agric. Water Manag.* 64(2), 107–122.
198. **Zhao, F. J.; Mc Grath, S. P.; Blade – Kalf, M. M. A.; Link, A., Tucker, M. 2003.** Crop responses to sulfur fertilization in Europe. *Nawozy i Nawożenie* 3(16), 26–51.
199. **Żarski, J.; Dudek, S.; Kuśmierk-Tomaszewska, R.; Januszewska-Klapa, K. 2013.** Potrzeby i efekty nawadniania kukurydzy uprawianej na ziarno w regionie Kujawsko-Pomorskim. *Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich.* 3/IV, 77–90.
200. **file:///C:/Users/Dom/Downloads/rocznik_statystyczny_rolnictwa_2022.pdf**
201. **<https://bdl.stat.gov.pl/bdl/dane/podgrup/tablica>**, wejście 07.03.2023, 10:40.
202. **<https://bdl.stat.gov.pl/bdl/dane/podgrup/tablica>**, wejście 08.03.2023, 11:45.
203. **https://coboru.gov.pl/Publikacje_COBORU/Wstepne_wyniki_PDO/WWPO_Kukurydza_porejstrowe2022.pdf**
204. **https://coboru.gov.pl/Publikacje_COBORU/Wstepne_wyniki_PDO/WWPO_Kukurydza_porejstrowe2019.pdf**
205. **<https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL>** wejście 02.02.2023
206. **https://rolniczenawozy.com/wp-content/uploads/2022/12/MSDS_WIGOR-S_WERSJA-3.0_PL.pdf**
207. **<https://agrosimex.pl/attachment/u/l/ultra-gran-stabilo-n46-phosagro-certyfikat-zgodnosci.pdf>**
208. **<https://agrosulca.com.pl/>**
209. **<https://www.google.pl/maps/>**

8. Spis tabel i rycin.

8.1. Tabele

- Tabela 1.1. Średnie pobranie jednostkowe oraz całkowite pobranie makroelementów z plonem kukurydzy¹.
- Tabela 1.2. Całkowite pobranie mikroelementów z plonem kukurydzy¹.
- Tabela 1.3. Plony potencjalne i rzeczywiste kukurydzy w Polsce¹.
- Tabela 1.4. Nawozy siarkowe mineralne obecne na rynku w Polsce¹.
- Tabela 2.1. Charakterystyka gleby przed założeniem doświadczenia w latach 2020-2022
- Tabela 2.2. Dawki oraz terminy stosowania nawozów, kg poletko⁻¹.
- Tabela 2.3.. Indeksy gospodarki azotem przed i po kwitnieniu kukurydzy.
- Tabela 4.1. Plon i struktura plonu kukurydzy – doświadczenie nienawadniane.
- Tabela 4.2. Plon i struktura plonu kukurydzy – doświadczenie nawadniane.
- Tabela 4.3. Biomasa kukurydzy w krytycznych stadiach formowania plonu – doświadczenie nienawadniane.
- Tabela 4.4. Biomasa kukurydzy w krytycznych stadiach formowania plonu – doświadczenie nawadniane.
- Tabela 4.5. Zawartość składników pokarmowych w kukurydzy w stadium BBCH 14 – doświadczenie nienawadniane.
- Tabela 4.6. Zawartość składników pokarmowych w kukurydzy w stadium BBCH 14 – doświadczenie nawadniane.
- Tabela 4.7. Zawartość składników pokarmowych w liściu podkolbowym kukurydzy i indeksy odżywienia w stadium BBCH 61 – doświadczenie nienawadniane.
- Tabela 4.8. Zawartość składników pokarmowych w liściu podkolbowym kukurydzy i indeksy odżywienia w stadium BBCH 61 – doświadczenie nawadniane.
- Tabela 4.9. Zawartość składników pokarmowych w łodydze kukurydzy w stadium BBCH 61 – doświadczenie nienawadniane.
- Tabela 4.10. Zawartość składników pokarmowych w łodydze kukurydzy w stadium BBCH 61 – doświadczenie nawadniane.
- Tabela 4.11. Zawartość składników pokarmowych w ziarnie kukurydzy – doświadczenie nienawadniane.
- Tabela 4.12. Zawartość składników pokarmowych w ziarnie kukurydzy – doświadczenie nawadniane.

- Tabela 4.13. Zawartość składników pokarmowych w słomie kukurydzy – doświadczenie nienawadniane.
- Tabela 4.14. Zawartość składników pokarmowych w słomie kukurydzy – doświadczenie nawadniane.
- Tabela 4.15. Azot mineralny (N_{min}) w glebie, kukurydza w stadium BBCH 14 - doświadczenie nienawadniane.
- Tabela 4.16. Azot mineralny (N_{min}) w glebie, kukurydza w stadium BBCH 14 – doświadczenie nawadniane.
- Tabela 4.17. Azot mineralny (N_{min}) w glebie w stadium BBCH 61 kukurydzy – doświadczenie nienawadniane.
- Tabela 4.18. Azot mineralny (N_{min}) w glebie w stadium BBCH 61 kukurydzy – doświadczenie nawadniane.
- Tabela 4.19. Azot mineralny (N_{min}) w glebie w stadium BBCH 89 kukurydzy – doświadczenie nienawadniane.
- Tabela 4.20. Azot mineralny (N_{min}) w glebie w stadium BBCH 89 kukurydzy – doświadczenie nawadniane.
- Tabela 4.21. Akumulacja azotu w okresie wegetacji kukurydzy i wskaźniki akumulacji – doświadczenie nienawadniane.
- Tabela 4.22. Akumulacja azotu w okresie wegetacji kukurydzy i wskaźniki akumulacji – doświadczenie nawadniane.
- Tabela 4.23. Wskaźniki gospodarki azotem w kukurydzy w okresie przed kwitnieniem (BBCH 15 –61) i po kwitnieniu (BBCH 61 – 89) – doświadczenie nienawadniane.
- Tabela 4.24. Wskaźniki gospodarki azotem w kukurydzy w okresie przed kwitnieniem (BBCH 15 –61) i po kwitnieniu (BBCH 61 – 89) – doświadczenie nawadniane.
- Tabela 5.1. Porównanie plonów doświadczalnych z danymi wzorcowymi i rzeczywistymi w Polsce, t ha⁻¹.
- Tabela 5.2. Składniki pokarmowe istotnie warunkujące plon ziarna – predykcja plonu.
- Tabela 5.3. Względna efektywność – dostępność N z nawozów w stadium BBCH 14.

8.2. Ryciny

Ryc. 1.1. Udział poszczególnych gatunków uprawnych w Polsce w roku 2022.

Ryc. 1.2. Przestrzenne zróżnicowanie odczynu gleb w Polsce w 2020 (pH w 1M KCl).

Ryc. 1.3. Procentowy udział poszczególnych klas zasobności w przyswajalne formy potasu, fosforu i magnezu w 2020 roku.

Ryc. 1.4. Saldo bilansowe siarki dla glebach obsiewanych, lata 2013-2015.

Ryc. 1.5. Fizjologia plonowania kukurydzy a zapotrzebowanie na azot.

Ryc. 2.1. Zdjęcie satelitarne gospodarstwa z lokalizacją doświadczeń.

Ryc. 2.2. Charakterystyka odmiany Es Cirrus.

Ryc. 4.1. Wpływ systemów nawożenia siarką i dawek azotu na plon ziarna – doświadczenie nienawadniane.

Ryc. 4.2. Wpływ systemów nawożenia siarką i dawek azotu na liczbę ziarniaków w kolbie – doświadczenie nienawadniane.

Ryc. 4.3. Wpływ systemów nawożenia siarką i dawek azotu na masę 1000 ziarniaków – doświadczenie nienawadniane.

Ryc. 4.4. Wpływ systemów nawożenia siarką i dawek azotu na plony ziarna – doświadczenie nawadniane.

Ryc. 4.5. Wpływ systemów nawożenia siarką i dawek azotu na masę 1000 ziarniaków – doświadczenie nawadniane.

Ryc. 4.6. Wpływ współdziałania lat i systemów nawożenia siarką na liczbę ziarniaków w łanie kukurydzy – doświadczenie nawadniane.

Ryc. 4.7. Wpływ współdziałania systemów nawożenia siarką i dawek azotu na biomasę całkowitą kukurydzy w stadium BBCH 89 – doświadczenie nienawadniane.

Ryc. 4.8. Wpływ współdziałania systemów nawożenia siarką i dawek azotu na biomasę całkowitą kukurydzy w stadium BBCH 89 – doświadczenie nawadniane.

Ryc. 4.9. Wpływ współdziałania lat i systemów nawożenia siarką na zawartość azotu w kukurydzy w stadium BBCH 14 – doświadczenie nienawadniane.

Ryc. 4.10. Wpływ współdziałania systemów nawożenia siarką i dawek azotu na zawartość magnezu w kukurydzy w stadium BBCH 14 – doświadczenie nienawadniane.

Ryc. 4.11. Wpływ współdziałania systemów nawożenia siarką i dawek azotu na zawartość fosforu w kukurydzy w stadium BBCH 14 – doświadczenie nienawadniane.

- Ryc. 4.12. Wpływ współdziałania lat i systemów nawożenia siarką na zawartość potasu w kukurydzy w stadium BBCH 14 – doświadczenie nawadniane.
- Ryc. 4.13. Wpływ współdziałania lat i systemów nawożenia siarką na zawartość magnezu w kukurydzy - doświadczenie nawadniane.
- Ryc. 4.14. Wpływ współdziałania lat i dawek azotu na indeksy SPAD w liściu podkolbowym kukurydzy w stadium BBCH 61 – doświadczenie nienawadniane.
- Ryc. 4.15. Wpływ współdziałania lat z dawkami azotu na zawartość azotu w liściu podkolbowym kukurydzy w stadium BBCH 61 – doświadczenie nienawadniane.
- Ryc. 4.16. Wpływ współdziałania lat i dawek azotu na zawartość wapnia w liściu podkolbowym kukurydzy w stadium BBCH 65 – doświadczenie nawadniane.
- Ryc. 4.17. Wpływ współdziałania lat i dawek azotu na wartość indeksu SPAD w liściu podkolbowym kukurydzy w stadium BBCH 61 – doświadczenie nawadniane.
- Ryc. 4.18. Wpływ współdziałania systemów nawożenia siarką i dawek azotu na zawartość manganu w liściu podkolbowym kukurydzy w stadium BBCH 61 – doświadczenie nawadniane.
- Ryc. 4.19. Wpływ współdziałania lat i systemów nawożenia siarką na zawartość azotu w liściu podkolbowym kukurydzy w stadium BBCH 61 – doświadczenie nawadniane.
- Ryc. 4.20. Zawartość manganu w pędzie kukurydzy w reakcji na dawki azotu dla systemów nawożenia siarką – doświadczenie nienawadniane.
- Ryc. 4.21. Zawartość azotu w pędzie kukurydzy w reakcji na dawki azotu dla systemów nawożenia siarką – doświadczenie nawadniane.
- Ryc. 4.22. Zawartość miedzi w pędzie kukurydzy w kolejnych latach badań na tle systemów nawożenia siarką – doświadczenie nawadniane.
- Ryc. 4.23. Zawartość magnezu w ziarnie kukurydzy w reakcji na systemy nawożenia siarką i dawek azotu – doświadczenie nienawadniane.
- Ryc. 4.24. Zawartość sodu w ziarnie kukurydzy w reakcji na współdziałanie systemów nawożenia siarką i dawek azotu - doświadczenie nienawadniane.
- Ryc. 4.25. Zawartość azotu w ziarnie kukurydzy w reakcji na współdziałanie lat i dawek

azotu - doświadczenie nienawadniane.

- Ryc. 4. 26. Plon ziarna jako wynik współdziałania zawartości żelaza i manganu w ziarnie – doświadczenie nawadniane.
- Ryc. 4. 27. Zawartość żelaza w ziarnie kukurydzy jako funkcja współdziałania lat i systemów nawożenia siarką – doświadczenie nawadniane.
- Ryc. 4. 28. Zawartość cynku w ziarnie kukurydzy jako efekt współdziałania lat i dawek azotu – doświadczenie nawadniane.
- Ryc. 4.29. Zawartość manganu w słomie kukurydzy w reakcji na systemy nawożenia siarką i dawki azotu – doświadczenie nienawadniane.
- Ryc. 4.30. Zawartość magnezu w słomie kukurydzy w reakcji na dawki azotu w latach badań – doświadczenie nawadniane.
- Ryc. 4.31. Masa i struktura rozmieszczenia form N_{\min} w warstwie 0-90 cm gleby w stadium BBCH 14 kukurydzy w zależności od systemów nawożenia siarką i dawek azotu – doświadczenie nienawadniane.
- Ryc. 4.32. Masa azotu azotanowego w warstwie 30-60 cm gleby ($B-NO_3$) w stadium BBCH 14 kukurydzy w zależności od systemów nawożenia siarką i dawek azotu – doświadczenie nienawadniane.
- Ryc. 4.33. Masa azotu amonowego w warstwie 60-90 cm gleby ($C-NH_4$) w stadium BBCH 14 kukurydzy w zależności od systemów nawożenia siarką i dawek azotu – doświadczenie nienawadniane.
- Ryc. 4.34. Masa i struktura rozmieszczenia form N_{\min} w warstwie 0-90 cm gleby w stadium BBCH 14 kukurydzy w zależności od systemów nawożenia siarką i dawek azotu – doświadczenie nawadniane.
- Ryc. 4.35. Masa azotu azotanowego w warstwie 60-90 cm gleby ($C-NO_3$) w stadium BBCH 14 kukurydzy w zależności od systemów nawożenia siarką i dawek azotu – doświadczenie nawadniane.
- Ryc. 4.36. Masa N_{\min} w glebie w latach na tle dawek azotu – doświadczenie nienawadniane.
- Ryc. 4.37. Masa i struktura rozmieszczenia form N_{\min} w warstwach gleby w stadium BBCH 61 kukurydzy w zależności od systemów nawożenia siarką i dawek azotu – doświadczenie nienawadniane.
- Ryc. 4.38. Masa azotu amonowego w warstwie 60-90 cm gleby ($C-NH_4$) w stadium BBCH 61 kukurydzy w latach w zależności od dawek azotu – doświadczenie nienawadniane.

- Ryc. 4.39. Masa N_{\min} w warstwie 60-90 cm gleby w stadium BBCH 61 kukurydzy w latach w zależności od dawek azotu – doświadczenie nienawadniane.
- Ryc. 4.40. Masa i struktura rozmieszczenia form N_{\min} w warstwie 0-90 cm gleby w stadium BBCH 61 kukurydzy w zależności od systemów nawożenia siarką i dawek azotu – doświadczenie nawadniane.
- Ryc. 4.41. Masa azotu amonowego ($A-NH_4$) w warstwie 0-30 cm gleby w stadium BBCH 61 kukurydzy w zależności od systemu nawożenia siarką i dawek azotu – doświadczenie nawadniane.
- Ryc. 4.42. Masa N_{\min} w warstwie 0-30 cm gleby w stadium BBCH 61 kukurydzy w zależności od systemu nawożenia siarką i dawek azotu – doświadczenie nawadniane.
- Ryc. 4.43. Masa i rozmieszczenia form N_{\min} w warstwach gleby w stadium BBCH 89 kukurydzy w zależności od systemów nawożenia siarką i dawek azotu – doświadczenie nienawadniane.
- Ryc. 4.44. Wpływ systemów nawożenia siarką i dawek azotu na masę $N-NH_4$ w warstwie 30-60 cm ($B-NH_4$) gleby w stadium BBCH 89 kukurydzy.
- Ryc. 4.45. Wpływ systemów nawożenia siarką i dawek azotu na masę $N-NO_3$ w warstwie 30-60 cm gleby ($B-NO_3$) – doświadczenie nienawadniane.
- Ryc. 4.46. Masa i rozmieszczenia form N_{\min} w warstwach gleby w stadium BBCH 89 kukurydzy w zależności od systemów nawożenia siarką i dawek azotu – doświadczenie nawadniane.
- Ryc. 4.47. Wpływ systemów nawożenia siarką i dawek azotu na masę $N-NO_3$ w warstwie 60-90 cm gleby ($C-NO_3$) w stadium BBCH 89 kukurydzy – doświadczenie nawadniane.
- Ryc. 4.48. Akumulacja azotu w ziarnie kukurydzy (N_z) w reakcji na dawki azotu i systemy nawożenia siarką – doświadczenie nienawadniane.
- Ryc. 4.49. Akumulacja azotu w słomie kukurydzy (N_s) w reakcji na dawki azotu i systemy nawożenia siarką – doświadczenie nienawadniane.
- Ryc. 4.50. Indeks żniwny azotu kukurydzy (IN) w reakcji na dawki azotu i systemy

nawożenia siarką – doświadczenie nienawadniane.

- Ryc. 4.51. Akumulacja azotu w ziarnie kukurydzy (Nz) w reakcji na dawki azotu i systemy nawożenia siarką – doświadczenie nawadniane.
- Ryc. 4.52. Akumulacja azotu w słomie kukurydzy (Ns) w reakcji na dawki azotu i systemy nawożenia siarką – doświadczenie nawadniane.
- Ryc. 4.53. Indeks żniwny azotu w kukurydzy (IN) w reakcji na dawki azotu i systemy nawożenia siarką – doświadczenie nawadniane
- Ryc. 4.54. Masa azotu w systemie gleba-roślina przed kwitnieniem (N_{in61} , BBCH 61) w latach na tle dawek azotu – doświadczenie nienawadniane.
- Ryc. 4.55. Efektywność akumulacji azotu przez kukurydzę na początku kwitnienia (EN_{in61} , BBCH 61 w latach na tle dawek azotu – doświadczenie nienawadniane.
- Ryc. 4.56. Masa azotu w systemie gleba-roślina w stadium BBCH 14 (N_{in14}) w latach w reakcji na systemy nawożenia siarką na tle dawek azotu – doświadczenie nienawadniane.
- Ryc. 4.57. Masa azotu w systemie gleba-roślina w stadium dojrzałości fizjologicznej kukurydzy (N_{in89}) w reakcji na system nawożenia azotem na tle dawek azotu – doświadczenie nienawadniane.
- Ryc. 4.58. Masa azotu *uruchomionego* w systemie gleba-roślina w okresie nalewania ziarna (N_{g89}) w reakcji na system nawożenia siarką na tle dawek azotu – doświadczenie nienawadniane.
- Ryc. 4.59. Efektywność akumulacji azotu przez kukurydzę w ziarnie (EN_{gr89}) w reakcji na systemy nawożenia siarką na tle dawek azotu – doświadczenie nienawadniane.
- Ryc. 4.60. Masa azotu w systemie gleba-roślina przed kwitnieniem (N_{in61}) w reakcji na systemy nawożenia siarką na tle dawek azotu – doświadczenie nawadniane.
- Ryc. 4.61 Masa azotu *uruchomionego* w systemie gleba-roślina w okresie przed kwitnieniem (N_{g61}) w latach reakcji na systemy nawożenia siarką na tle dawek azotu – doświadczenie nawadniane.
- Ryc. 4.62. Masa azotu w systemie gleba-roślina w okresie nalewania ziarna (N_{in89}) w reakcji na system nawożenia siarką na tle dawek azotu na tle dawek azotu – doświadczenie nawadniane.

Ryc. 5.1. Wartości indeksu SPAD w reakcji na zawartość siarki i azotu w liściu podkolbowym kukurydzy – doświadczenie nienawadniane.

Ryc. 5.2. Bilans N_{\min} w okresie wzrostu wegetatywnego kukurydzy jako funkcja masy N w systemie gleba roślina w stadium BBCH 14.

8.3. Ryciny – załączniki.

Ryc. Z4.1. Plon ziarna jako funkcja dawek azotu dla systemów nawożenia siarką – doświadczenie nienawadniane.

Ryc. Z4.2. Liczba ziarniaków w kolbie jako funkcja dawek azotu dla systemów nawożenia siarką – doświadczenie nienawadniane.

Ryc. Z4.3. Masa 1000 ziarniaków jako funkcja dawek azotu dla obiektów nawożonych siarką – doświadczenie nienawadniane.

Ryc. Z4.4. Plon ziarna jako funkcja dawek azotu dla systemów nawożenia siarką – doświadczenie nawadniane.

Ryc. Z4.5. Masa 1000 ziarniaków jako funkcja dawek azotu dla systemów nawożenia siarką – doświadczenie nawadniane.

Ryc. Z4.6. Trendy reakcji biomasy całkowitej kukurydzy w reakcji na dawki azotu na tle systemów nawożenia siarką – doświadczenie nienawadniane.

Ryc. Z4.7. Trendy indeksu żniwnego kukurydzy w reakcji na dawki azotu na tle systemów nawożenia siarką – doświadczenie nienawadniane.

Ryc. Z4.8. Trendy reakcji biomasy całkowitej kukurydzy w reakcji na dawki azotu na tle systemów nawożenia siarką – doświadczenie nawadniane.

Ryc. Z4.9. Trendy indeksu żniwnego kukurydzy w reakcji na dawki azotu na tle systemów nawożenia siarką – doświadczenie nawadniane.

Ryc. Z4.10. Trendy zawartość magnezu w kukurydzy w stadium BBCH 14 jako funkcja dawek azotu dla obiektów nawożonych siarką – doświadczenie nienawadniane.

Ryc. Z4.11. Trendy zawartości fosforu w kukurydzy w stadium BBCH 14 jako funkcja dawek azotu dla obiektów nawożonych siarką – doświadczenie nienawadniane.

Ryc. Z4.12. Trendy zawartości potasu w kukurydzy w latach w stadium BBCH 14 jako funkcja dawek azotu – doświadczenie nawadniane.

Ryc. Z4.13. Wpływ lat i dawek azotu na zawartość miedzi w liściu podkolbowym kukurydzy – doświadczenie nienawadniane.

- Ryc. Z4.14. Plon ziarna jako funkcja stosunku N/S w liściu podkolbowym kukurydzy w stadium BBCH 61 – doświadczenie nienawadniane.
- Ryc. Z4.15. Trendy indeksów SPAD w latach na tle dawek azotu – doświadczenie nawadniane.
- Ryc. Z4.16. Trendy zawartości manganu dla systemów nawożenia siarką na tle dawek azotu – doświadczenie nawadniane.
- Ryc. Z4.17. Plon ziarna jako funkcja stosunku N/S w liściu podkolbowym kukurydzy w stadium BBCH 15 – doświadczenie nawadniane.
- Ryc. Z.4.18. Trendy zawartości manganu w pędzie kukurydzy w reakcji na wzrastające dawki azotu na tle systemów nawożenia siarką – doświadczenie nienawadniane.
- Ryc. Z.4.19. Zawartość miedzi i cynku na tle zawartości manganu w pędzie kukurydzy – doświadczenie nienawadniane.
- Ryc. Z.4.20. Trendy zawartości azotu w pędzie kukurydzy w reakcji na wzrastające dawki azotu na tle systemów nawożenia siarką – doświadczenie nawadniane.
- Ryc. Z4.21. Trendy zawartości magnezu w ziarnie dla dawek azotu na tle systemów nawożenia siarką – doświadczenie nienawadniane
- Ryc. Z4.22. Trendy zawartości azotu w ziarnie dla dawek azotu w latach – doświadczenie nienawadniane
- Ryc. Z4.23. Zawartość manganu w ziarnie kukurydzy jako funkcja zawartości potasu i cynku – doświadczenie nawadniane.
- Ryc. Z.4.24. Trendy zawartości manganu w słomie kukurydzy dla systemów nawożenia siarką na tle dawek azotu – doświadczenie nienawadniane
- Ryc. Z.4.25. Zawartość cynku w słomie kukurydzy jako efekt współdziałania lat i dawek azotu – doświadczenie nienawadniane.
- Ryc. Z.4.26. Zawartość fosforu w słomie kukurydzy w reakcji na dawki azotu dla systemów nawożenia siarką – doświadczenie nawadniane.
- Ryc. Z. 4.27. Wpływ współdziałania systemów nawożenia siarką i dawek azotu na strukturę procentową rozmieszczenia form azotu w glebie – doświadczenie nienawadniane.
- Ryc. Z.4.28. Wpływ współdziałania systemów nawożenia siarką i dawek azotu na strukturę procentową rozmieszczenia form azotu w glebie – doświadczenie nawadniane.

- Ryc. Z4.29. Wpływ współdziałania systemów nawożenia siarką i dawek azotu na strukturę procentową rozmieszczenia form azotu w glebie w stadium BBCH 61 – doświadczenie nienawadniane.
- Ryc. Z4.30. Wpływ współdziałania systemów nawożenia siarką i dawek azotu na strukturę procentową rozmieszczenia form azotu w glebie – doświadczenie nawadniane.
- Ryc. Z4.31. Wpływ współdziałania systemów nawożenia siarką i dawek azotu na strukturę procentową rozmieszczenia form azotu w glebie w stadium BBCH 89 – doświadczenie nienawadniane.
- Ryc. Z4.32. Wpływ dawek azotu na tle lat na masę N_{\min} w glebie w stadium BBCH 89 kukurydzy – doświadczenie nawadniane.
- Ryc. Z4.33. Wpływ współdziałania systemów nawożenia siarką i dawek azotu na strukturę procentową rozmieszczenia form azotu w glebie w stadium BBCH 89 – doświadczenie nawadniane.
- Ryc. Z4.34. Trendy akumulacji azotu w ziarnie dla systemów nawożenia siarką na tle dawek azotu – doświadczenie nienawadniane.
- Ryc. Z4.35. Trendy akumulacji azotu w słomie dla systemów nawożenia siarką na tle dawek azotu – doświadczenie nienawadniane.
- Ryc. Z4.36. Wpływ akumulacji azotu w słomie (N_s) na trendy wskaźników: AJN (akumulacja jednostkowa azotu), PJN (produktywność jednostkowa azotu), IN (indeks żniwny) – doświadczenie nienawadniane.
- Ryc. Z4.37. Trendy akumulacji całkowitej azotu przez kukurydzę (N_{Ac}) dla systemów nawożenia siarką na tle dawek azotu – doświadczenie nienawadniane.
- Ryc. Z4.38. Trendy indeksu żniwnego azotu (IN) dla systemów nawożenia siarką na tle dawek azotu – doświadczenie nienawadniane.
- Ryc. Z4.39. Akumulacja azotu w stadium BBCH 14 kukurydzy (AN_{14}) w reakcji na dawki azotu i systemów nawożenia siarką – doświadczenie nienawadniane.
- Ryc. Z4.40. Trendy wskaźnika akumulacji jednostkowej azotu przez kukurydzę (AJN) dla systemów nawożenia siarką na tle dawek azotu – doświadczenie nienawadniane;
- Ryc. Z4.41. Produktywność jednostkowa azotu kukurydzy w latach na tle dawek azotu – doświadczenie nienawadniane.
- Ryc. Z4.42. Trendy akumulacji azotu w ziarnie (N_z) dla systemów nawożenia siarką na tle dawek azotu – doświadczenie nawadniane.

- Ryc. Z4.43. Trendy akumulacji azotu w słomie kukurydzy (Ns) dla systemów nawożenia siarką na tle dawek azotu – doświadczenie nawadniane.
- Ryc. Z4.44. Akumulacja całkowita azotu (NAc) przez kukurydzę w reakcji na dawki azotu i systemy nawożenia siarką – doświadczenie nawadniane.
- Ryc. Z4.45. Trendy akumulacji całkowitej azotu (NAc) przez kukurydzę dla systemów nawożenia siarką na tle dawek azotu na dawki azotu – doświadczenie nawadniane.
- Ryc. Z4.46. Akumulacja azotu w stadium BBCH 14 (NA₁₄) kukurydzy w latach na tle dawek azotu – doświadczenie nawadniane.
- Ryc. Z4.47. Akumulacja azotu w stadium BBCH 61 (NA₆₁) kukurydzy w latach w reakcji na dawki azotu – doświadczenie nawadniane.
- Ryc. Z4.48. Akumulacja jednostkowa azotu kukurydzy (AJN) w reakcji na dawki azotu systemy nawożenia siarką – doświadczenie nawadniane.
- Ryc. Z4.49. Produktywność jednostkowa azotu przez kukurydzę (PJN) dla systemów nawożenia siarką na tle dawek azotu – doświadczenie nawadniane.
- Ryc. Z4.50. Wpływ akumulacji N w słomie na trendy wskaźników: AJN (akumulacja jednostkowa azotu), PJN (produktywność jednostkowa azotu), IN (indeks żniwny) – doświadczenie nawadniane.
- Ryc. Z4.51. Saldo bilansowe azotu w układzie gleba/roślina w okresie przed kwitnieniem (BBCH 15 – BBCH 61) a masa azotu uruchomiona z zasobów glebowych – doświadczenie nienawadniane.
- Ryc. Z.4.52. Saldo bilansowe azotu w układzie gleba/roślin w okresie nalewania ziarna (BBCH 61 – BBCH 89) a masa azotu uruchomiona z zasobów glebowych – doświadczenie nienawadniane.
- Ryc. Z.4.53. Saldo bilansowe azotu w układzie gleba/roślina w okresie przed kwitnieniem (BBCH 15 – BBCH 61) a masa azotu uruchomiona z zasobów glebowych – doświadczenie nawadniane.
- Ryc. Z4.54. Saldo bilansowe azotu w układzie gleba/roślina w okresie nalewania ziarna (BBCH 61 – BBCH 89) a masa azotu uruchomiona z zasobów glebowych – doświadczenie nawadniane.
- Ryc. Z5.1. Diagram plonu średniego maksymalnego – doświadczenie nienawadniane
- Ryc. Z5.2. Diagram plonu średniego maksymalnego – doświadczenie nawadniane

8.4. Załączniki

Załącznik 2.1. Zabiegi agrotechniczne i terminy wykonania

Załącznik 4.1a. Plon i elementy struktury plonu kukurydzy, doświadczenie nienawadniane – współdziałanie czynników doświadczalnych.

Załącznik 4.1b. Plon i elementy struktury plonu kukurydzy, doświadczenie nienawadniane, n = 54.

Załącznik 4.2a. Plon i elementy struktury plonu kukurydzy, doświadczenie nawadniane – współdziałanie czynników doświadczalnych.

Załącznik 4.2b. Macierz korelacji dla elementów struktury plonu i plonu, doświadczenie nawadniane, n = 54.

Załącznik 4.3a. Struktura biomasy kukurydzy – współdziałanie czynników doświadczalnych – doświadczenie nienawadniane.

Załącznik 4.3b. Macierz korelacji dla składników biomasy kukurydzy – doświadczenie nienawadniane, n = 54.

Załącznik 4.4a. Struktura biomasy kukurydzy – współdziałanie czynników doświadczalnych – doświadczenie nawadniane.

Załącznik 4.4b. Macierz korelacji dla składników biomasy kukurydzy – doświadczenie nawadniane, n = 54.

Załącznik 4.5a. Zawartość składników pokarmowych w kukurydzy w stadium BBCH 14, współdziałania – doświadczenie nienawadniane.

Załącznik 4.5b. Macierz korelacji między składnikami pokarmowymi w stadium BBCH 14 a biomasą kukurydzy w BBCH 15 i plonem ziarna, doświadczenie nienawadniane, n = 54.

Załącznik 4.6a. Zawartość składników pokarmowych w kukurydzy w stadium BBCH 14, współdziałania – doświadczenie nawadniane.

Załącznik 4.6b. Macierz korelacji między składnikami pokarmowymi w stadium BBCH 14 a biomasą kukurydzy w BBCH 14 i plonem ziarna, doświadczenie nawadniane, n = 54.

Załącznik 4.7a. Zawartość składników pokarmowych w liściu podkolbowym kukurydzy i indeksy odżywienia w stadium BBCH 61, współdziałania – doświadczenie nienawadniane.

- Załącznik 4.7b. Macierz korelacji między składnikami pokarmowymi w stadium BBCH 65 a plonem ziarna i indeksami odżywienia doświadczenie nienawadniane, n = 54.
- Załącznik 4.8a. Zawartość składników pokarmowych w liściu podkolbowym kukurydzy i indeksy odżywienia w stadium BBCH 65, współdziałania – doświadczenie nawadniane.
- Załącznik 4.8b. Macierz korelacji między składnikami pokarmowymi w stadium BBCH 65 a plonem ziarna i indeksami odżywienia doświadczenie nawadniane, n = 54.
- Załącznik 4.9a. Zawartość składników pokarmowych w łodydze kukurydzy w stadium BBCH, współdziałania – doświadczenie nienawadniane.
- Załącznik 4.9b. Macierz korelacji między składnikami pokarmowymi w stadium BBCH 61 a plonem ziarna – doświadczenie nienawadniane, n = 54.
- Załącznik 4.10a. Zawartość składników pokarmowych w łodydze kukurydzy w stadium BBCH 61, współdziałania – doświadczenie nawadniane.
- Załącznik 4.10b. Macierz korelacji między składnikami pokarmowymi w stadium BBCH 61 a plonem ziarna – doświadczenie nawadniane, n = 54.
- Załącznik 4.11a. Zawartość składników pokarmowych w ziarnie kukurydzy, współdziałania – doświadczenie nienawadniane.
- Załącznik 4.11b. Macierz korelacji między składnikami pokarmowymi w ziarnie a plonem ziarna – doświadczenie nienawadniane, n = 54.
- Załącznik 4.12a. Zawartość składników pokarmowych w ziarnie kukurydzy, współdziałania – doświadczenie nienawadniane.
- Załącznik 4.12b. Macierz korelacji między składnikami pokarmowymi w ziarnie a plonem ziarna – doświadczenie nawadniane, n = 54.
- Załącznik 4.13a. Zawartość składników pokarmowych w słomie kukurydzy, współdziałania – doświadczenie nienawadniane.
- Załącznik 4.13b. Macierz korelacji między składnikami pokarmowymi w słomie kukurydzy a plonem ziarna – doświadczenie nienawadniane, n = 54.
- Załącznik 4.14a. Zawartość składników pokarmowych w słomie kukurydzy, współdziałania – doświadczenie nawadniane.
- Załącznik 4.14b. Macierz korelacji między składnikami pokarmowymi w słomie kukurydzy a plonem ziarna i indeksami odżywienia – doświadczenie nawadniane, n = 54.

- Załącznik 4.15a. Masa azotu mineralnego (N_{\min}) w glebie w stadium BBCH 14, kg N ha^{-1} , współdziałania – doświadczenie nienawadniane.
- Załącznik 4.15b. Macierz korelacji między N_{\min} a plonem ziarna i składowymi plonu, doświadczenie nienawadniane, $n = 27$.
- Załącznik 4.16a. Zawartość azotu mineralnego (N_{\min}) w glebie w stadium BBCH 14, współdziałania – doświadczenie nawadniane.
- Załącznik 4.16b. Macierz korelacji między N_{\min} a plonem ziarna i składowymi plonu0, doświadczenie nienawadniane, $n = 27$.
- Załącznik 4.17a. Zawartość azotu mineralnego (N_{\min}) w glebie w stadium BBCH 61, współdziałania – doświadczenie nienawadniane.
- Załącznik 4.17b. Macierz korelacji między N_{\min} a plonem ziarna i składowymi plonu, doświadczenie nienawadniane, $n = 27$.
- Załącznik 4.18a. Zawartość azotu mineralnego (N_{\min}) w glebie w stadium BBCH 61, współdziałania – doświadczenie nawadniane.
- Załącznik 4.18b. Macierz korelacji między N_{\min} a plonem ziarna i składowymi plonu, doświadczenie nawadniane, $n = 27$.
- Załącznik 4.19a. Zawartość azotu mineralnego (N_{\min}) w glebie w stadium BBCH 89, współdziałania – doświadczenie nienawadniane.
- Załącznik 4.19b. Macierz korelacji między N_{\min} a plonem ziarna i składowymi plonu, doświadczenie nienawadniane, $n = 27$.
- Załącznik 4.20a. Zawartość azotu mineralnego (N_{\min}) w glebie w stadium BBCH 89, współdziałania – doświadczenie nawadniane.
- Załącznik 4.20b. Macierz korelacji między N_{\min} a plonem ziarna i składowymi plonu, doświadczenie nawadniane, $n = 27$.
- Załącznik 4.21a. Akumulacja azotu w okresie wegetacji kukurydzy, wskaźniki akumulacji, współdziałania – doświadczenie nienawadniane.
- Załącznik 4.21b. Macierz korelacji składowych i wskaźników akumulacji azotu, doświadczenie nienawadniane, $n = 54$.
- Załącznik 4.22a. Akumulacja azotu w okresie wegetacji kukurydzy, wskaźniki akumulacji, współdziałania – doświadczenie nawadniane.
- Załącznik 4.22b. Macierz korelacji składowych i wskaźników akumulacji azotu, doświadczenie nawadniane, $n = 54$.
- Załącznik 4.23a. Wskaźniki gospodarki azotem w kukurydzy w okresie przed i po kwitnieniu, współdziałania – doświadczenie nienawadniane.

- Załącznik 4.23b. Macierz korelacji wskaźników gospodarki kukurydzy azotem w okresie przed kwitnieniem, n = 27.
- Załącznik 4.23c. Macierz korelacji wskaźników gospodarki kukurydzy azotem w okresie po kwitnieniu, n = 27.
- Załącznik 4.24a. Wskaźniki gospodarki azotem w kukurydzy w okresie przed i po kwitnieniu, współdziałania – doświadczenie nawadniane.
- Załącznik 4.24b. Macierz korelacji wskaźników gospodarki kukurydzy azotem w okresie przed kwitnieniem, n = 27.
- Załącznik 4.24c. Macierz korelacji wskaźników gospodarki kukurydzy azotem w okresie po kwitnieniu, n = 27.
- Załącznik 5.1. Ocena zawartości składników pokarmowych w ziarnie na tle zakresów optymalnych^{1,2,3}.
- Załącznik 5.2. Ocena wpływu lat i systemów nawożenia siarką na stan odżywienia kukurydzy stadium BBCH 14 na podstawie zawartości składników pokarmowych w biomacie roślin.
- Załącznik 5.3. Typ zależności między masą całej rośliny i liścia podkolbowego, a zawartością składników pokarmowych w kukurydzy w stadium BBCH 61.
- Załącznik 5.4. Ocena wpływu lat i systemów nawożenia siarką na stan odżywienia kukurydzy w stadium BBCH 61 na podstawie zawartości składników pokarmowych w liściu podkolbowym.
- Załącznik 5.5. Ocena wpływu lat i systemów nawożenia siarką na stan odżywienia kukurydzy w stadium BBCH 61 na podstawie zawartości składników pokarmowych w pędzie.
- Załącznik 5.6. Predykcja plonu i podstawowych elementów struktury plonu na podstawie masy wskaźników gospodarki N w stadium BBCH 14.
- Załącznik 5.7. Predykcja plonu i podstawowych elementów struktury plonu na podstawie masy wskaźników gospodarki azotem w stadium BBCH 61.
- Załącznik 5.8. Predykcja plonu i podstawowych elementów struktury plonu na podstawie masy wskaźników gospodarki azotem w fazie nalewania ziarna.

8.5. Zdjęcia

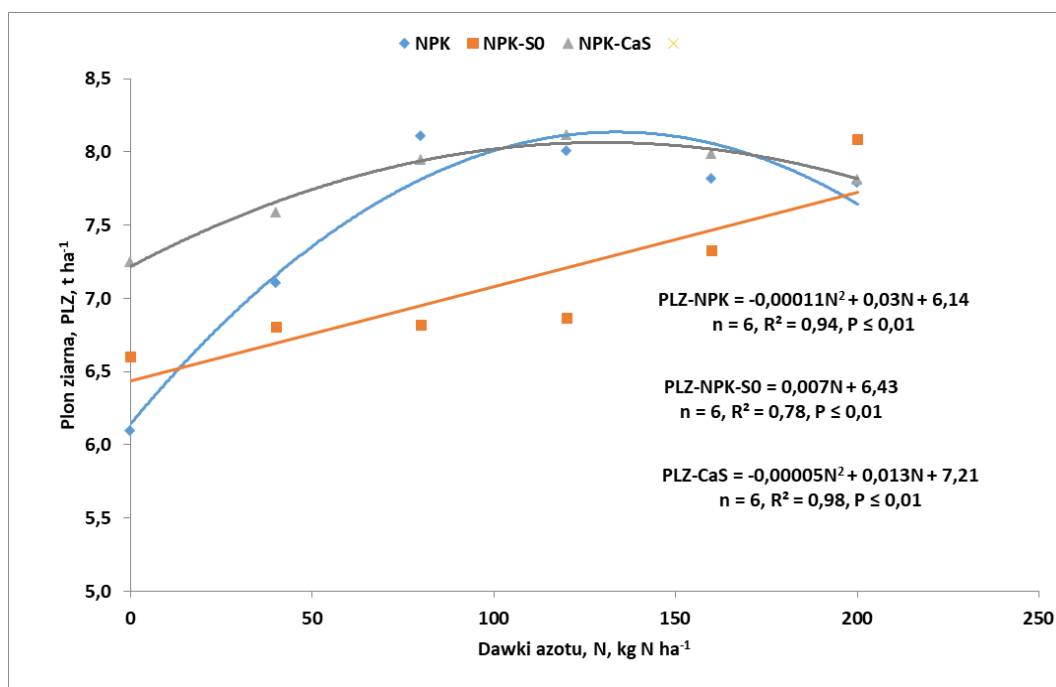
Fot. 1.1. Klasyczny niedobór i nadmiar azotu

Fot. 1.2 Klasyczne objawy niedoboru fosforu (a) i potasu (b) we wczesnych stadiach rozwoju kukurydzy.

Fot. 1.3. Objawy niedoboru magnezu (a) i siarki (b) w kukurydzy.

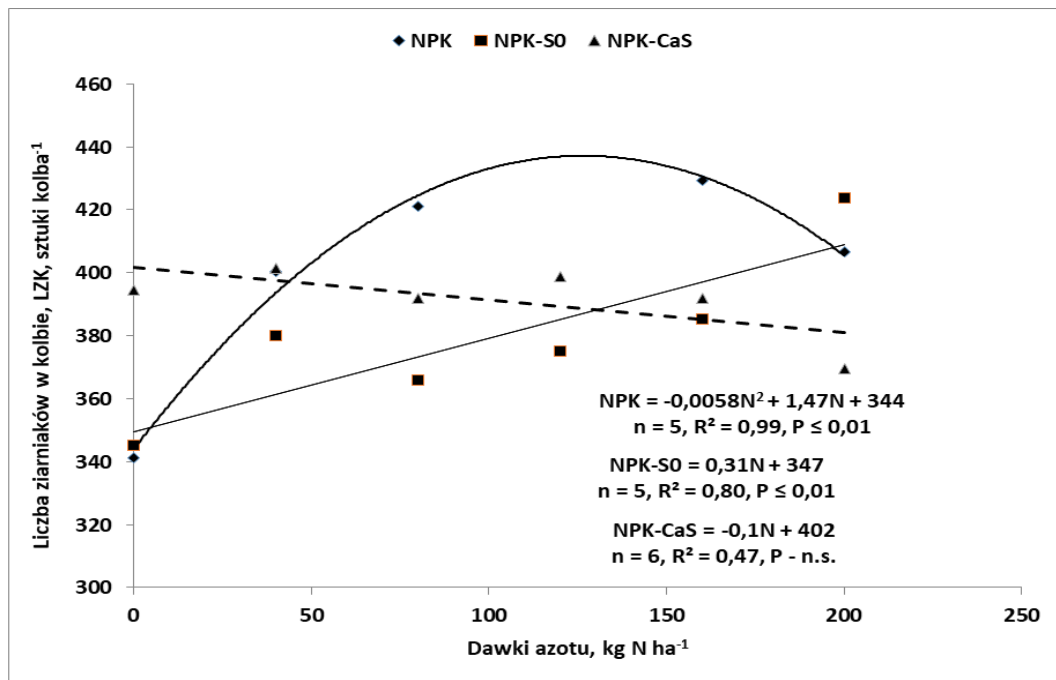
Fot. 2.1. Stadia pobierania próbek roślinnych

9. Ryciny załączniki



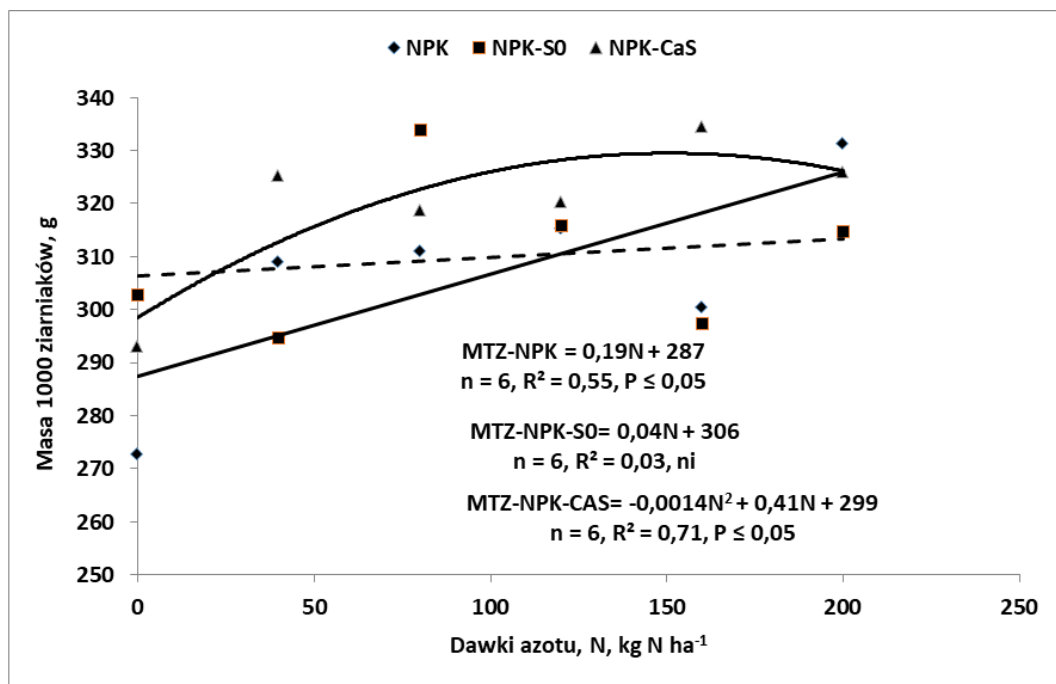
Ryc. Z4.1. Plon ziarna jako funkcja dawek azotu dla systemów nawożenia siarką – doświadczenie nienawadniane.

Źródło: opracowanie własne.



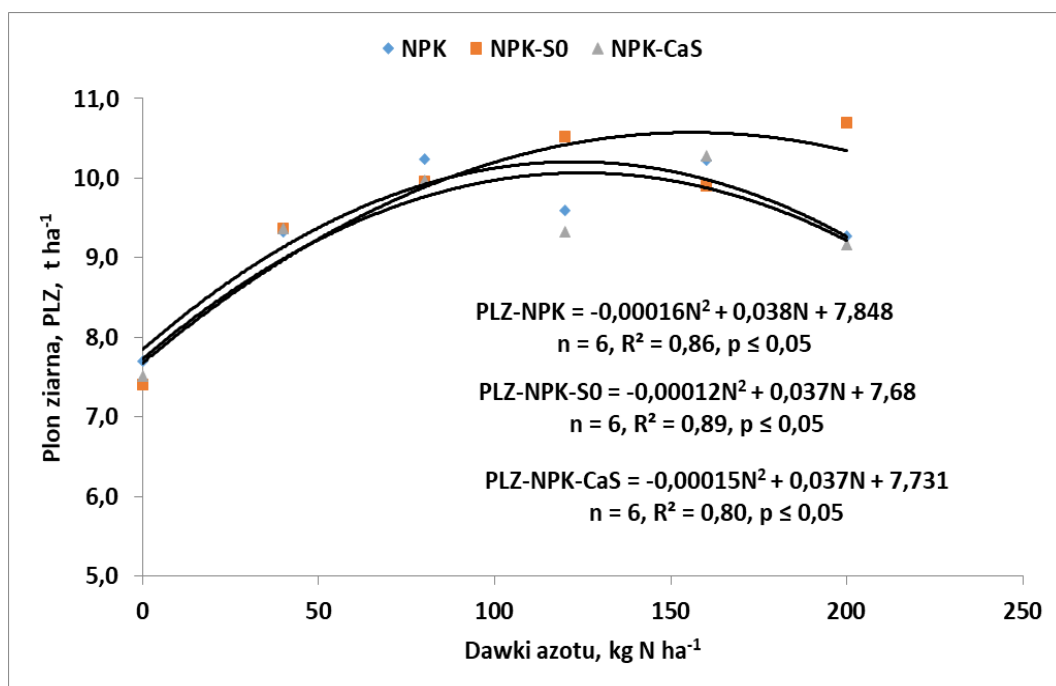
Ryc. Z4.2. Liczba ziarniaków w kolbie jako funkcja dawek azotu dla systemów nawożenia siarką – doświadczenie nienawadniane, ns – nieistotne.

Źródło: opracowanie własne



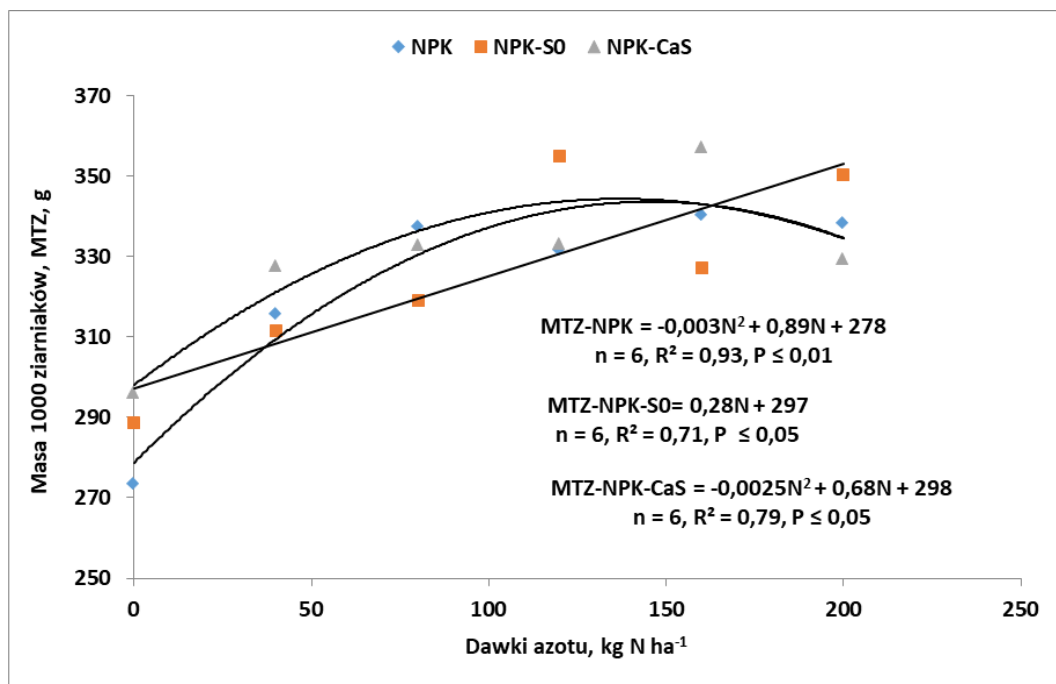
Ryc. Z4.3. Masa 1000 ziarniaków jako funkcja dawek azotu dla obiektów nawożonych siarką – doświadczenie nienawadniane, ns – nieistotne.

Źródło: opracowanie własne



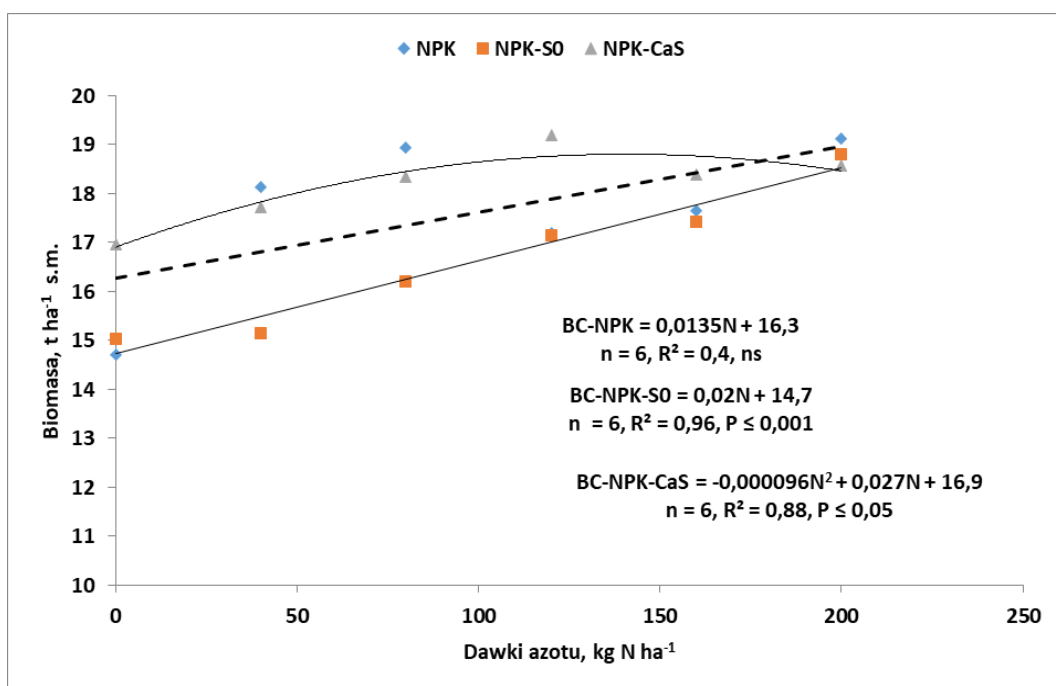
Ryc. Z4.4. Plon ziarna jako funkcja dawek azotu dla systemów nawożenia siarką – doświadczenie nawadniane.

Źródło: opracowanie własne.



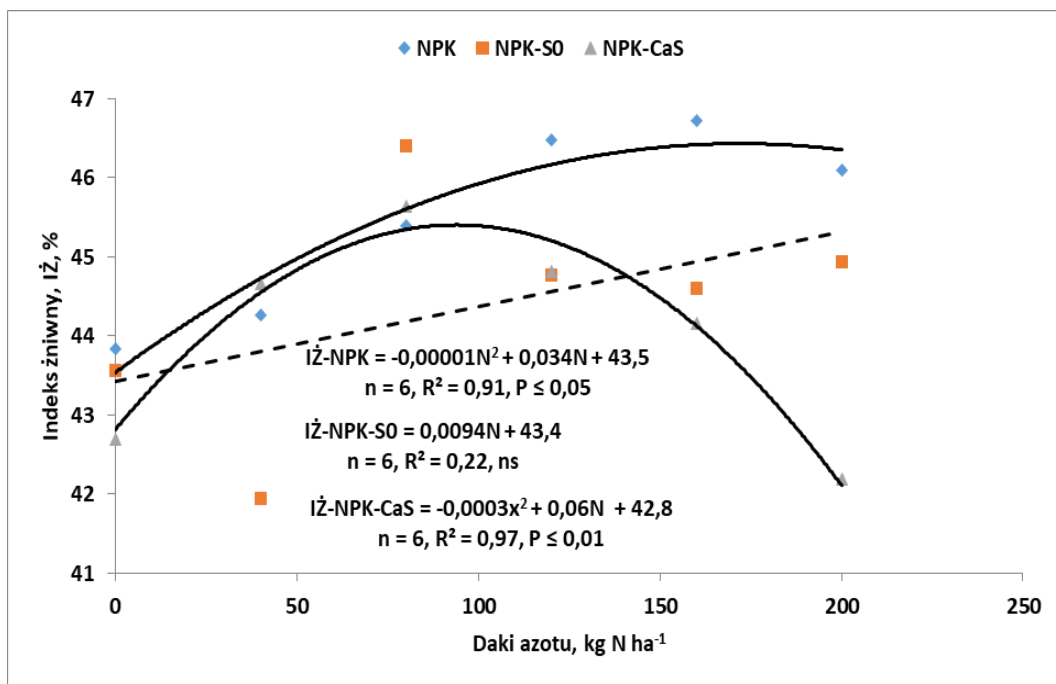
Ryc. Z4.5. Masa 1000 ziarniaków jako funkcja dawek azotu dla systemów nawożenia siarką – doświadczenie nawadniane.

Źródło: opracowanie własne.



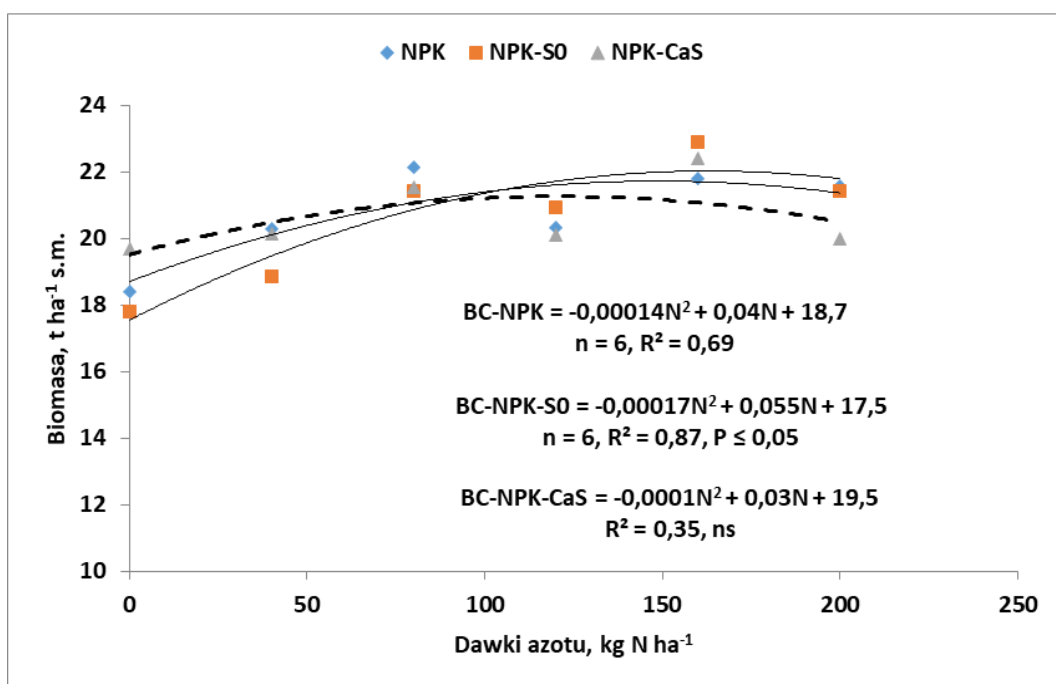
Ryc. Z4.6. Trendy reakcji biomasy całkowitej kukurydzy w reakcji na dawki azotu na tle systemów nawożenia siarką – doświadczenie nienawadniane.

Źródło: opracowanie własne.



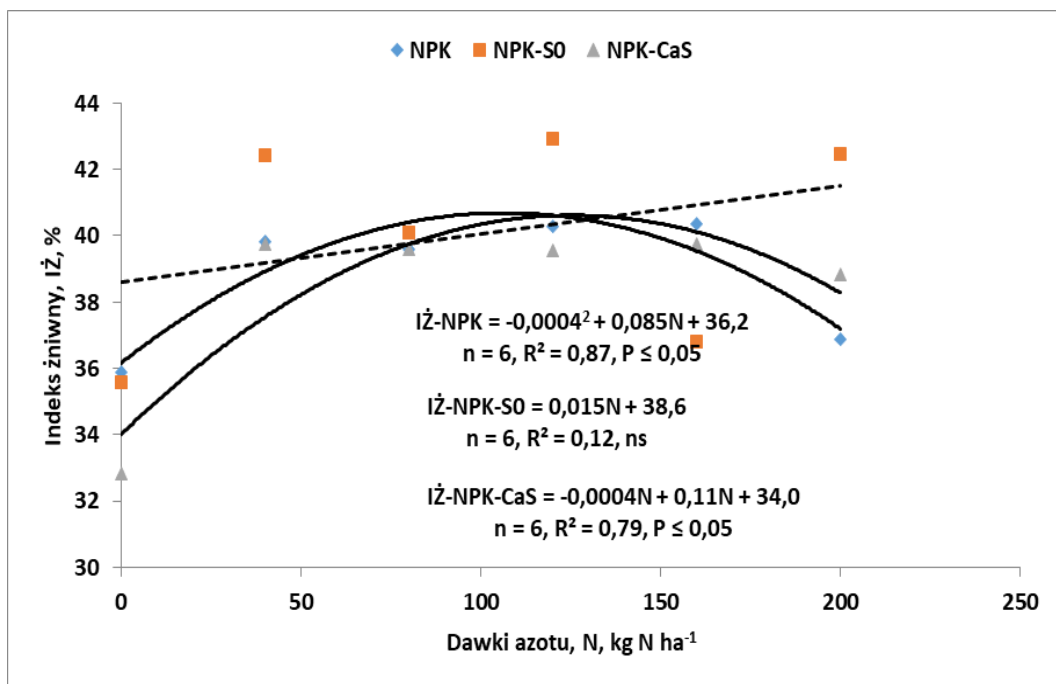
Ryc. Z4.7. Trendy indeksu żniwnego kukurydzy w reakcji na dawki azotu na tle systemów nawożenia siarką – doświadczenie nienawadniane.

Źródło: opracowanie własne.



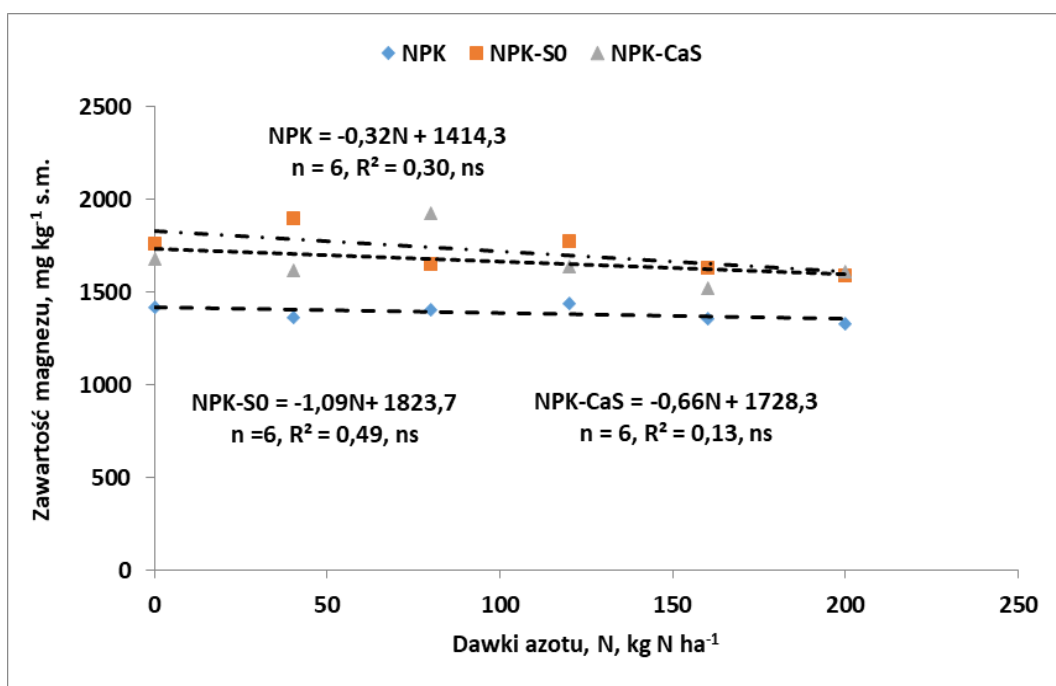
Ryc. Z4.8. Trendy reakcji biomasy całkowitej kukurydzy w reakcji na dawki azotu na tle systemów nawożenia siarką – doświadczenie nawadniane.

Źródło: opracowanie własne.



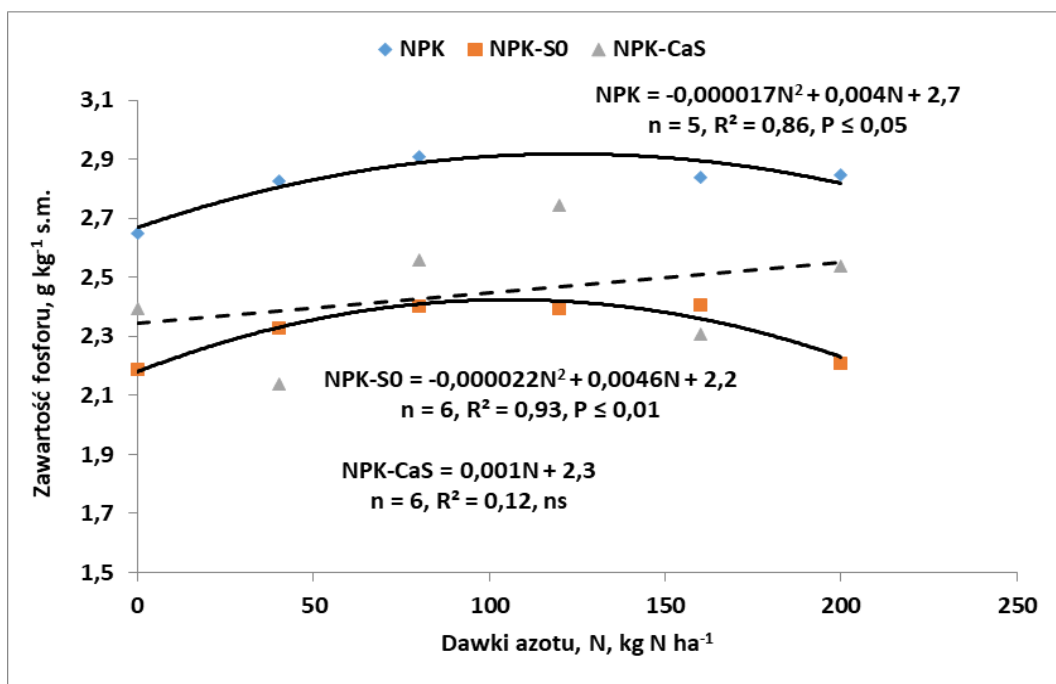
Ryc. Z4.9. Trendy indeksu żniwnego kukurydzy w reakcji na dawki azotu na tle systemów nawożenia siarką – doświadczenie nawadniane.

Źródło: opracowanie własne.

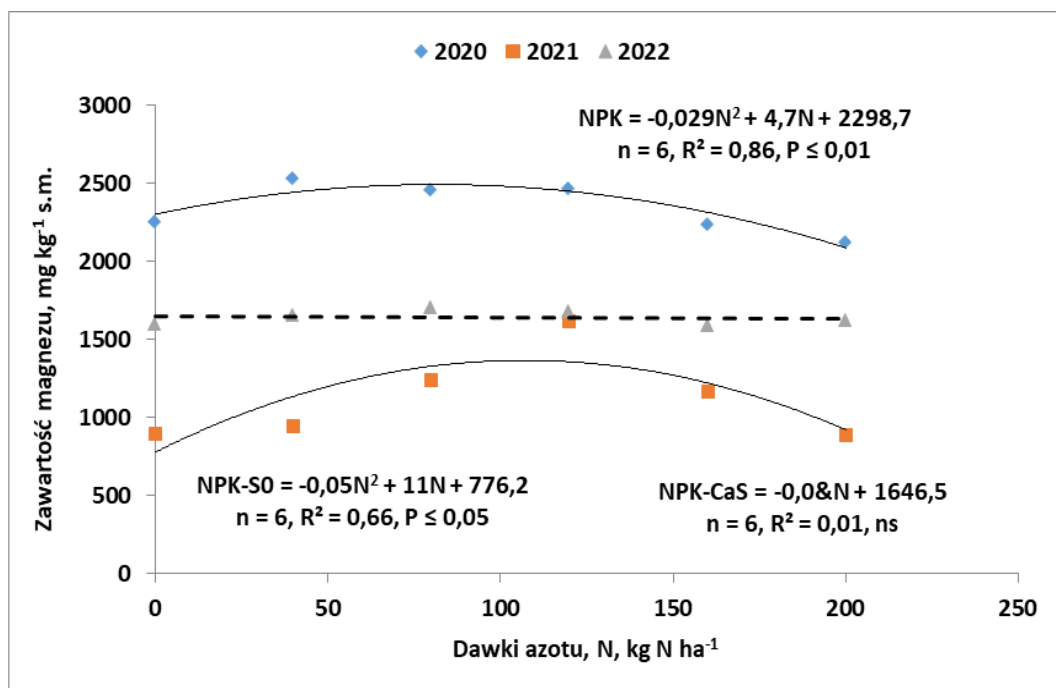


Ryc. Z4.10. Trendy zawartość magnezu w kukurydzy w stadium BBCH 14 jako funkcja dawek azotu dla obiektów nawożonych siarką – doświadczenie nienawadniane.

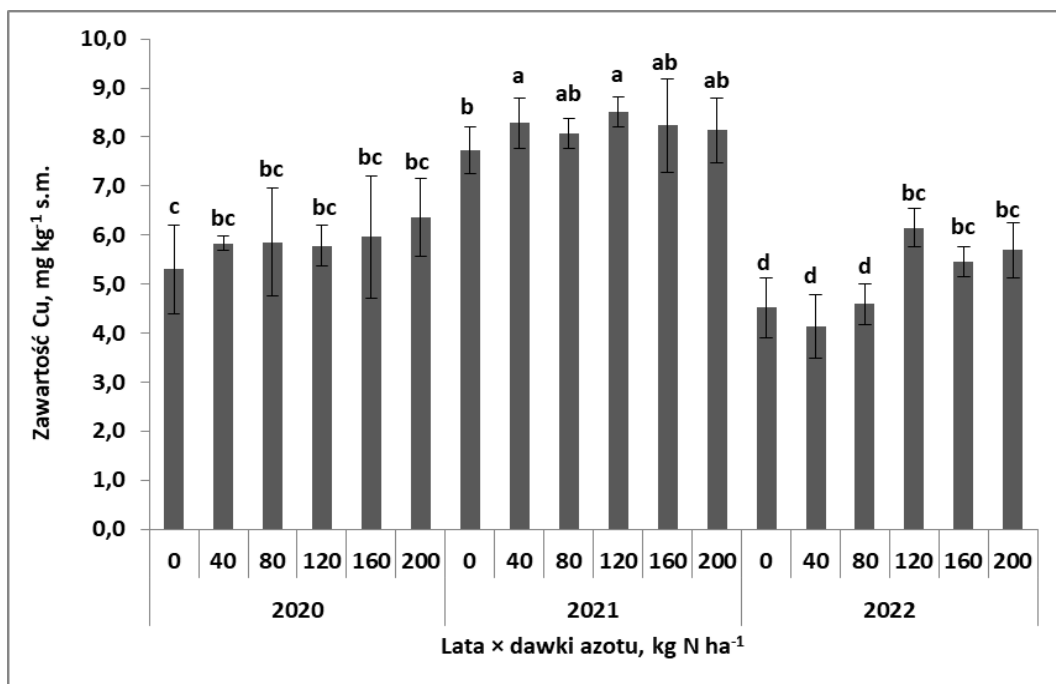
Źródło: opracowanie własne.



Ryc. Z4.11. Trendy zawartości fosforu w kukurydzy w stadium BBCH 14 jako funkcja dawek azotu dla obiektów nawożonych siarką — doświadczenie nienawadniane.
Źródło: opracowanie własne.

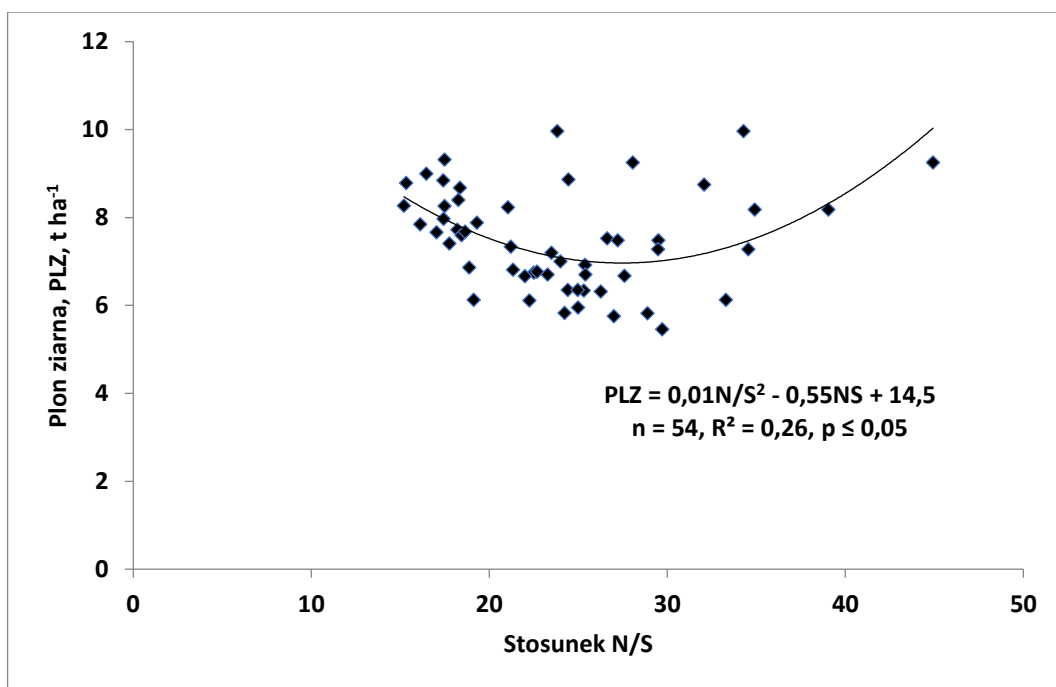


Ryc. Z4.12. Trendy zawartości potasu w kukurydzy w latach w stadium BBCH 14 jako funkcja dawek azotu — doświadczenie nawadniane.
Źródło: opracowanie własne.



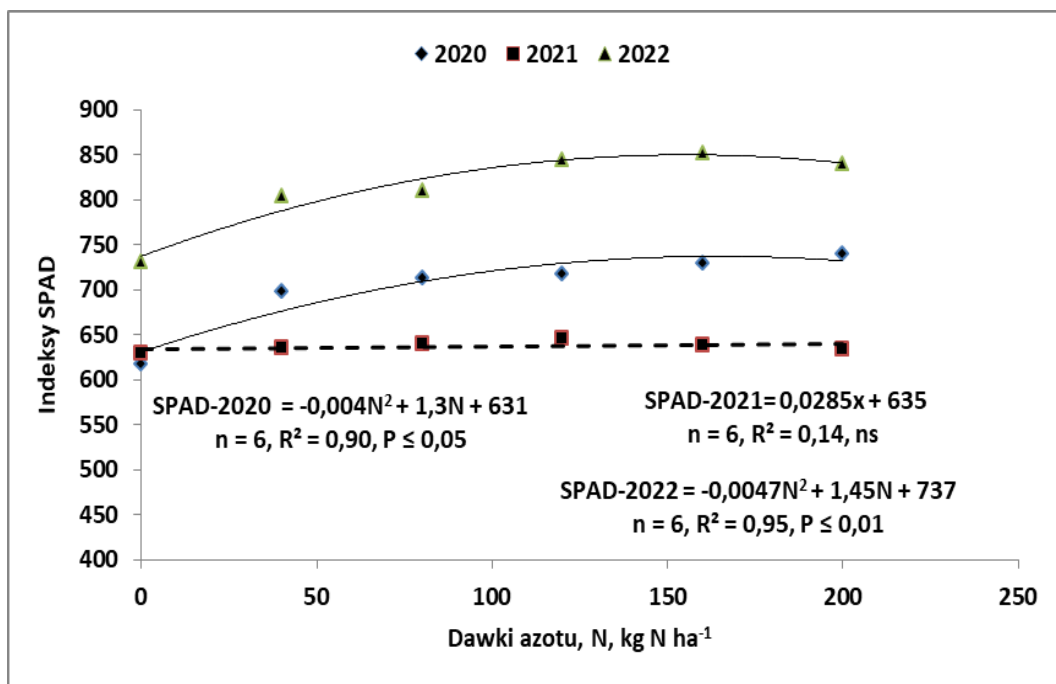
Ryc. Z4.13. Wpływ lat i dawek azotu na zawartość miedzi w liściu podkolbowym kukurydzy – doświadczenie nienawadniane.

Źródło: opracowanie własne. ^ate same oznaczenia literowe oznaczają brak istotnych różnic między kolumnami; pionowy słupek w kolumnie określa wielkość standardowego błędu średniej.



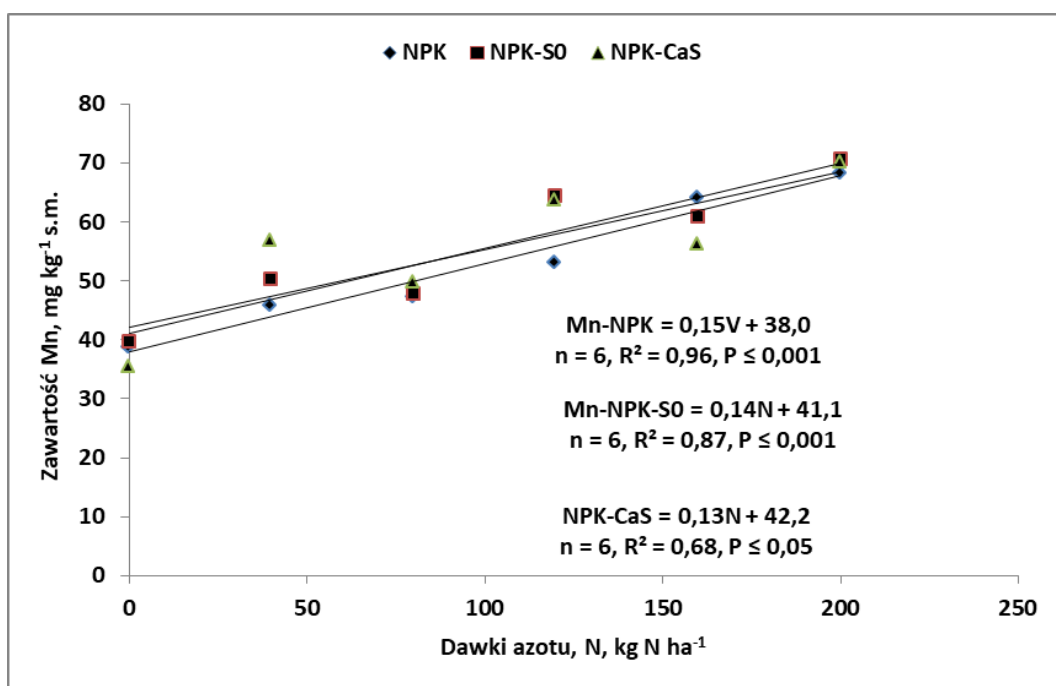
Ryc. Z4.14. Plon ziarna jako funkcja stosunku N/S w liściu podkolbowym kukurydzy w stadium BBCH 61 – doświadczenie nienawadniane.

Źródło: opracowanie własne.



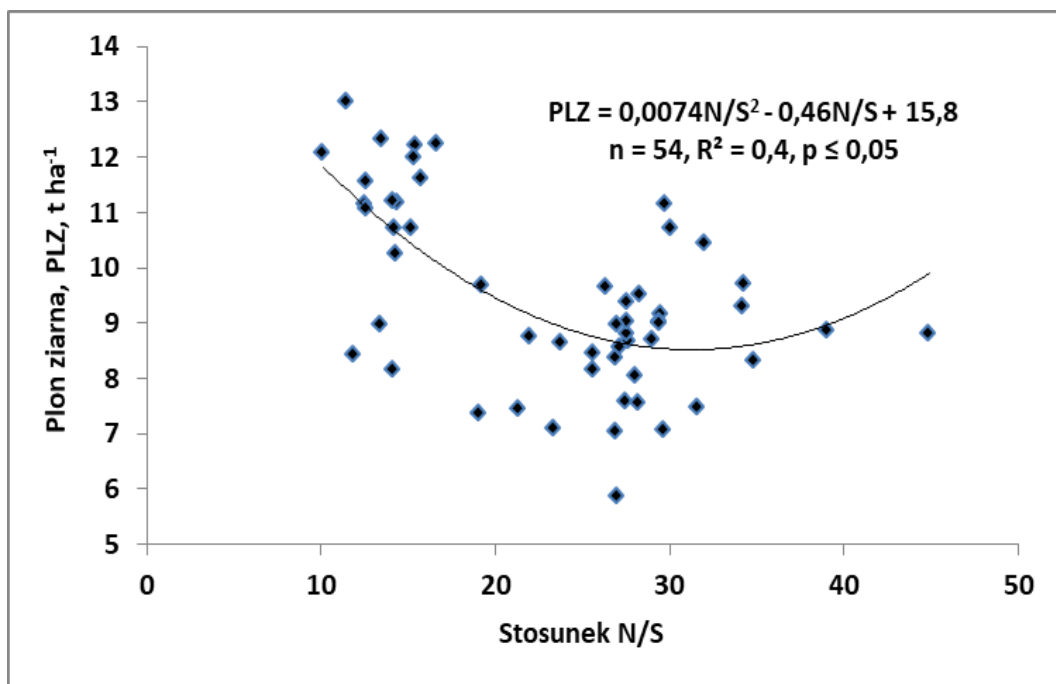
Ryc. Z4.15. Trendy indeksów SPAD w latach na tle dawek azotu – doświadczenie nawadniane.

Źródło: opracowanie własne.



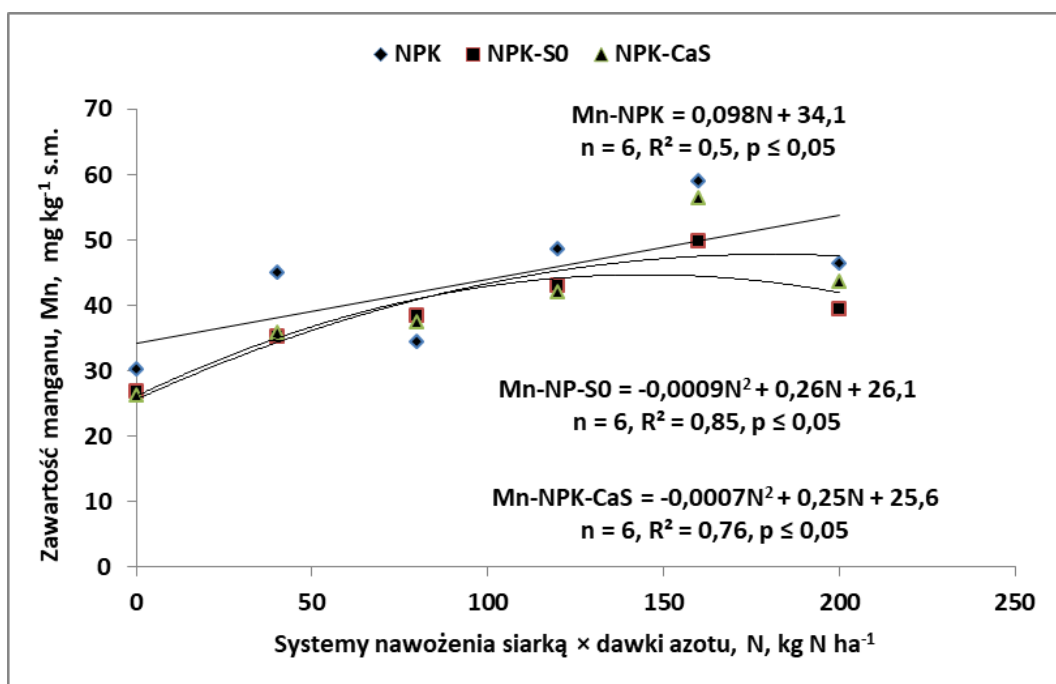
Ryc. Z4.16. Trendy zawartości manganu dla systemów nawożenia siarką na tle dawek azotu – doświadczenie nawadniane.

Źródło: opracowanie własne.



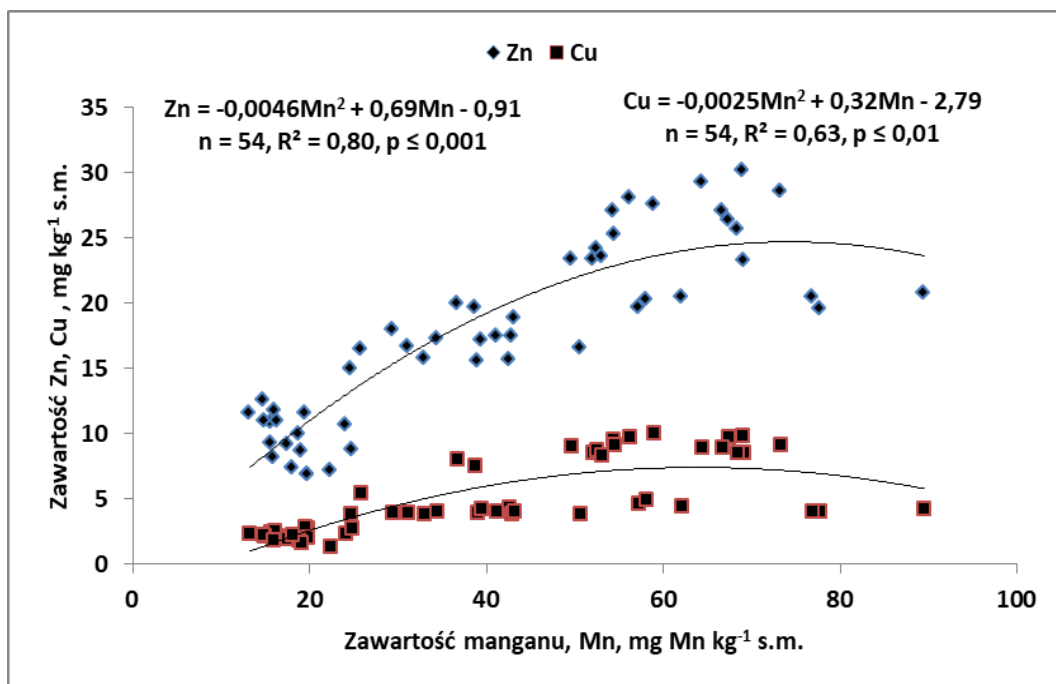
Ryc. Z4.17. Plon ziarna jako funkcja stosunku N/S w liściu podkolbowym kukurydzy w stadium BBCH 15 – doświadczenie nawadniane.

Źródło: opracowanie własne.



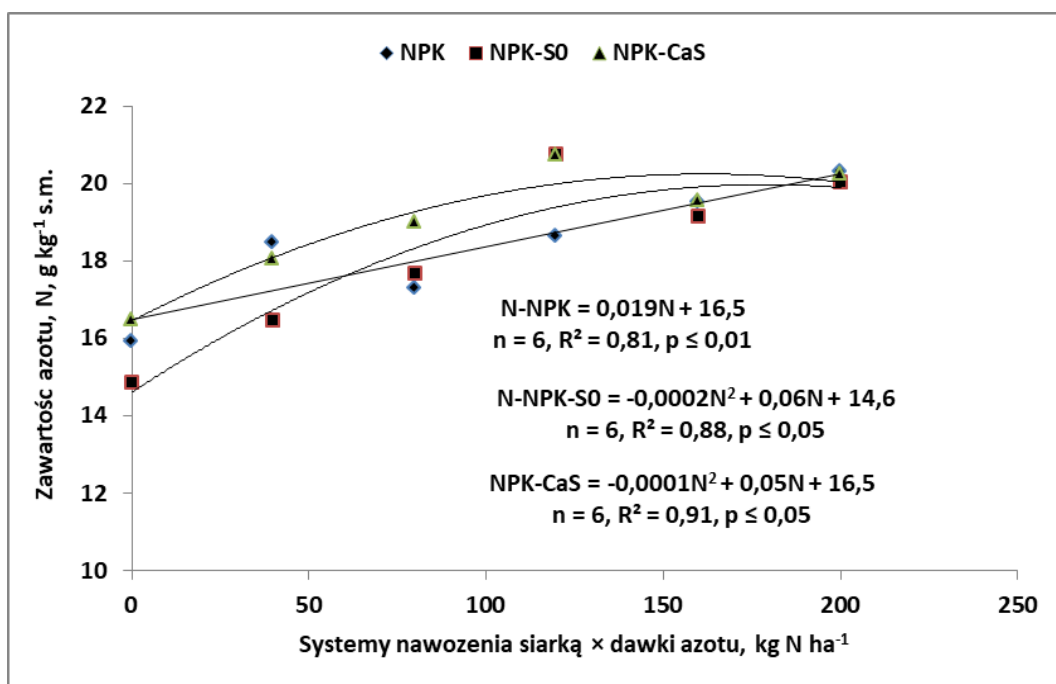
Ryc. Z.4.18. Trendy zawartości manganu w pędzie kukurydzy w reakcji na wzrastające dawki azotu na tle systemów nawożenia siarką – doświadczenie nienawadniane.

Źródło: opracowanie własne.



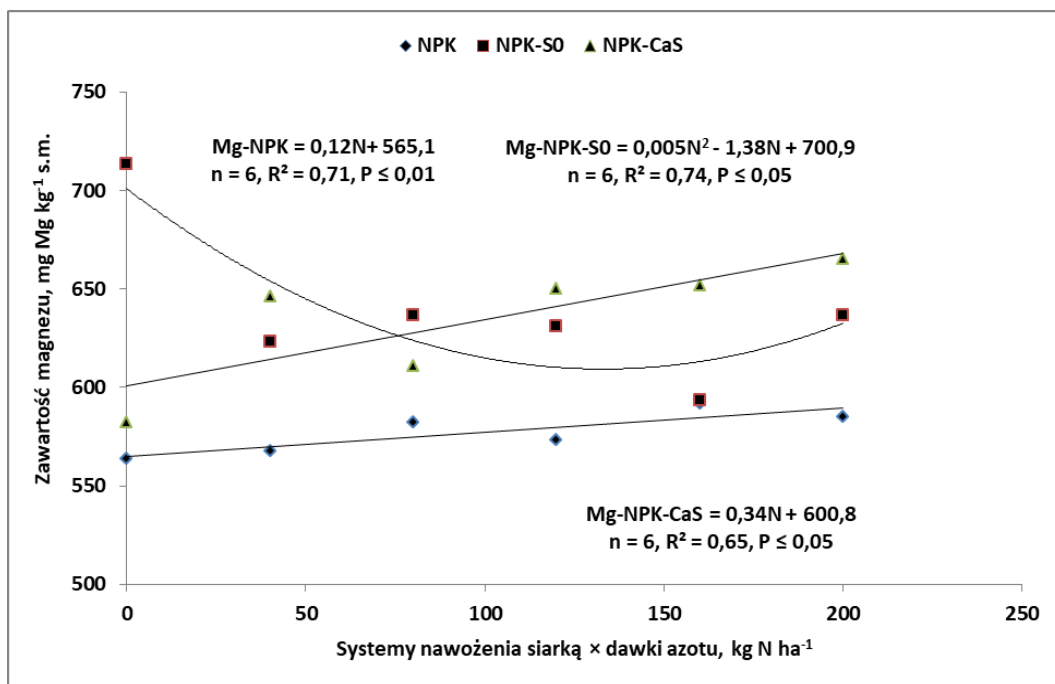
Ryc. Z.4.19. Zawartość miedzi i cynku na tle zawartości manganu w pędzie kukurydzy – doświadczenie nienawadniane.

Źródło: opracowanie własne.



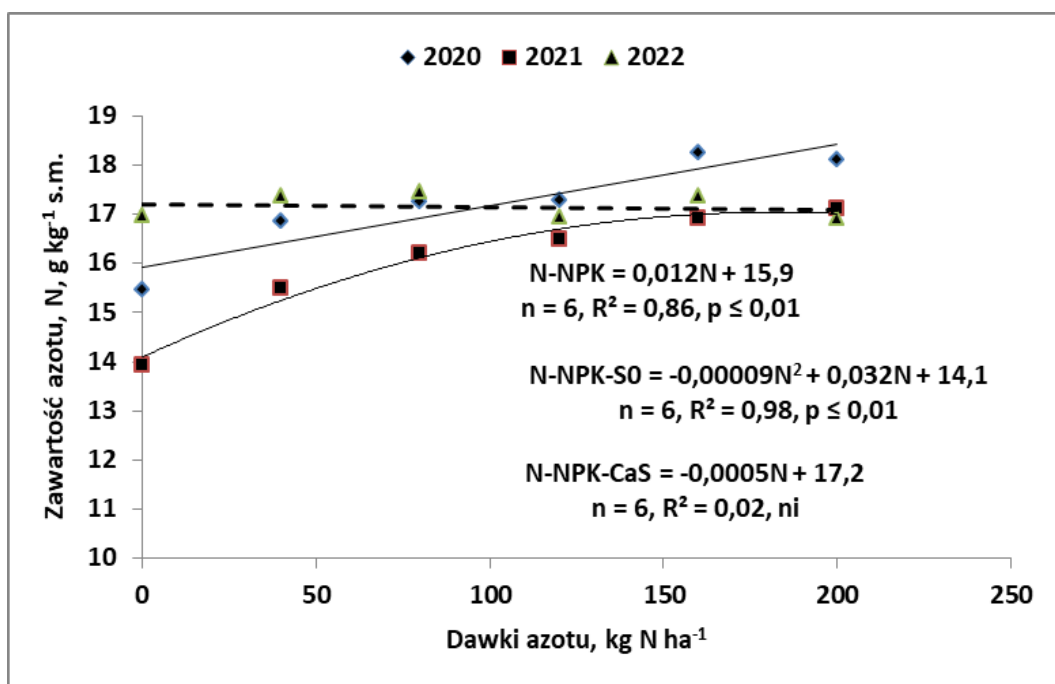
Ryc. Z.4.20. Trendy zawartości azotu w pędzie kukurydzy w reakcji na wzrastające dawki azotu na tle systemów nawożenia siarką – doświadczenie nawadniane.

Źródło: opracowanie własne.



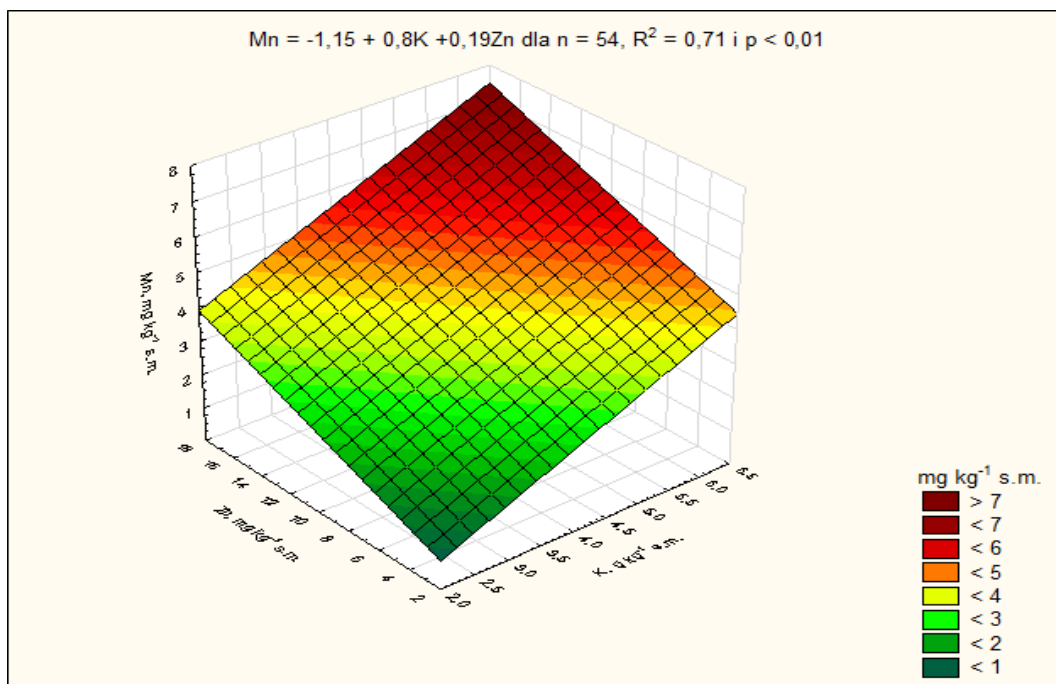
Ryc. Z4.21. Trendy zawartości magnezu w ziarnie dla dawek azotu na tle systemów nawożenia siarką – doświadczenie nienawadniane.

Źródło: opracowanie własne.



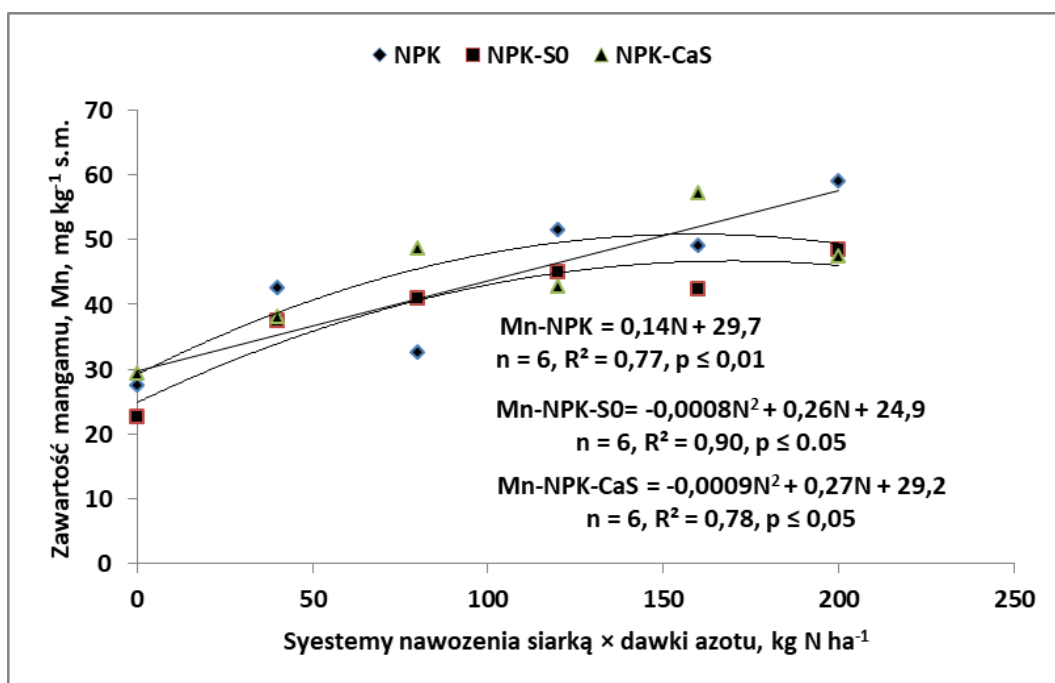
Ryc. Z4.22. Trendy zawartości azotu w ziarnie dla dawek azotu w latach – doświadczenie nienawadniane.

Źródło: opracowanie własne.



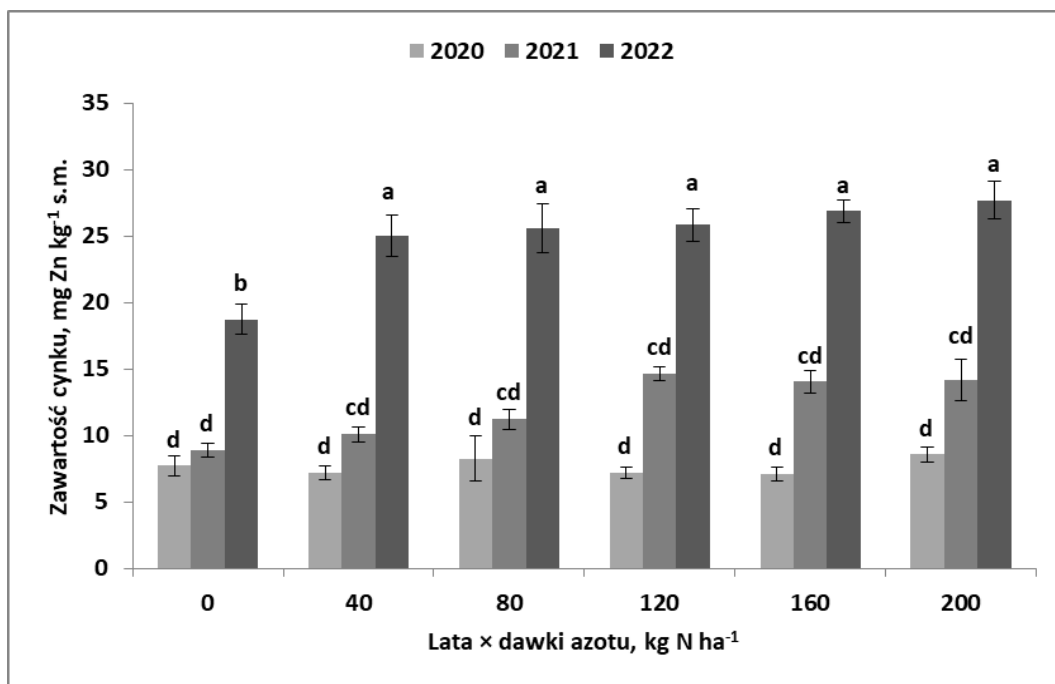
Ryc. Z4.23. Zawartość manganu w ziarnie kukurydzy jako funkcja zawartości potasu i cynku – doświadczenie nawadniane.

Źródło: opracowanie własne.



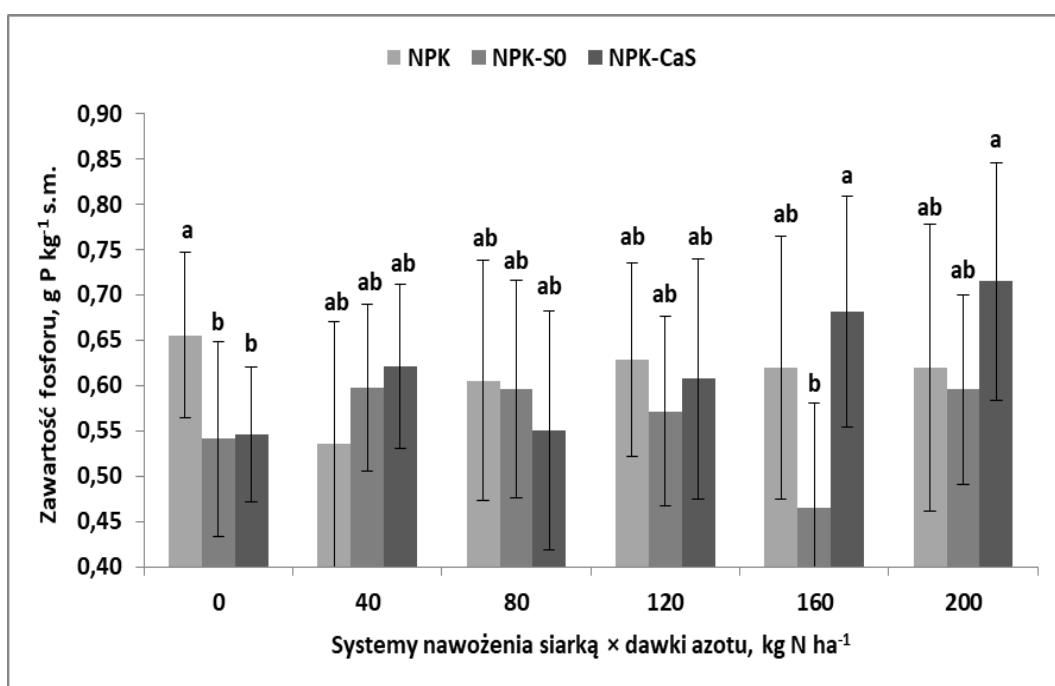
Ryc. Z.4.24. Trendy zawartości manganu w słomie kukurydzy dla systemów nawożenia siarką na tle dawek azotu – doświadczenie nienawadniane.

Źródło: opracowanie własne.



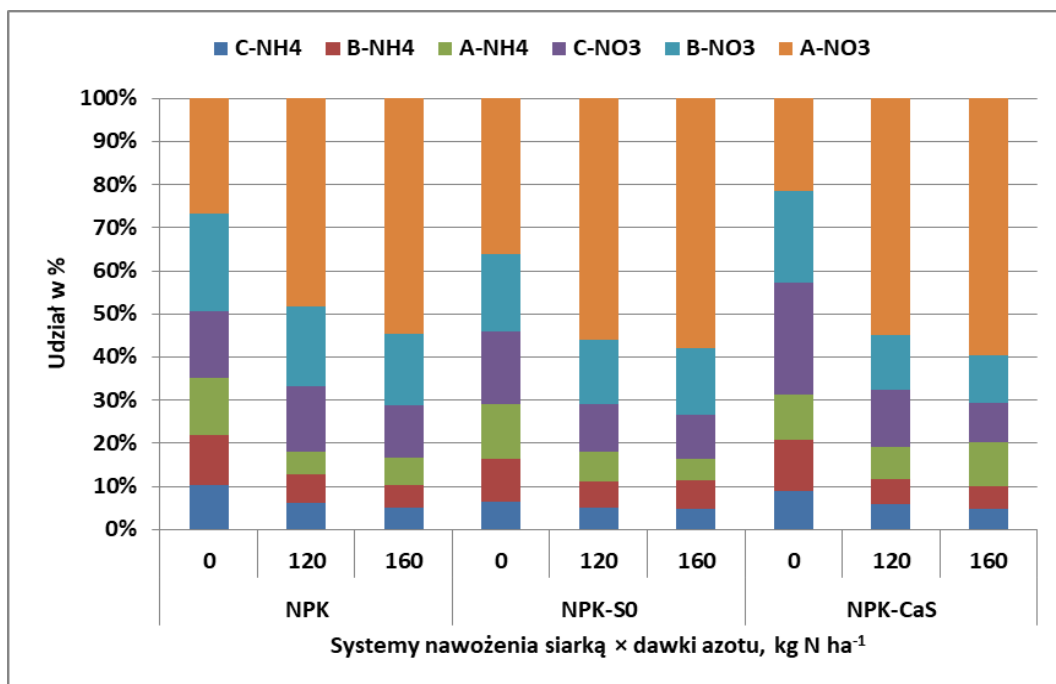
Ryc. Z.4.25. Zawartość cynku w słomie kukurydzy jako efekt współdziałania lat i dawek azotu – doświadczenie nienawadniane.

Źródło: opracowanie własne. ^ate same oznaczenia literowe oznaczają brak istotnych różnic między kolumnami; pionowy słupek w kolumnie określa wielkość standardowego błęd średniej.

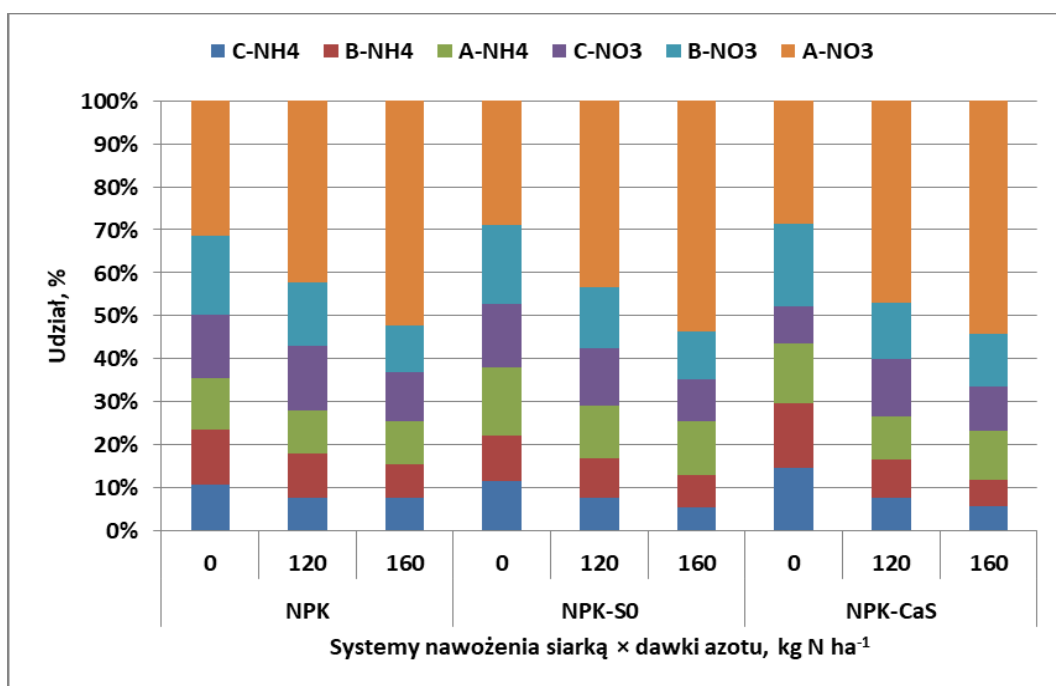


Ryc. Z.4.26. Zawartość fosforu w słomie kukurydzy w reakcji na dawki azotu dla systemów nawożenia siarką – doświadczenie nawadniane.

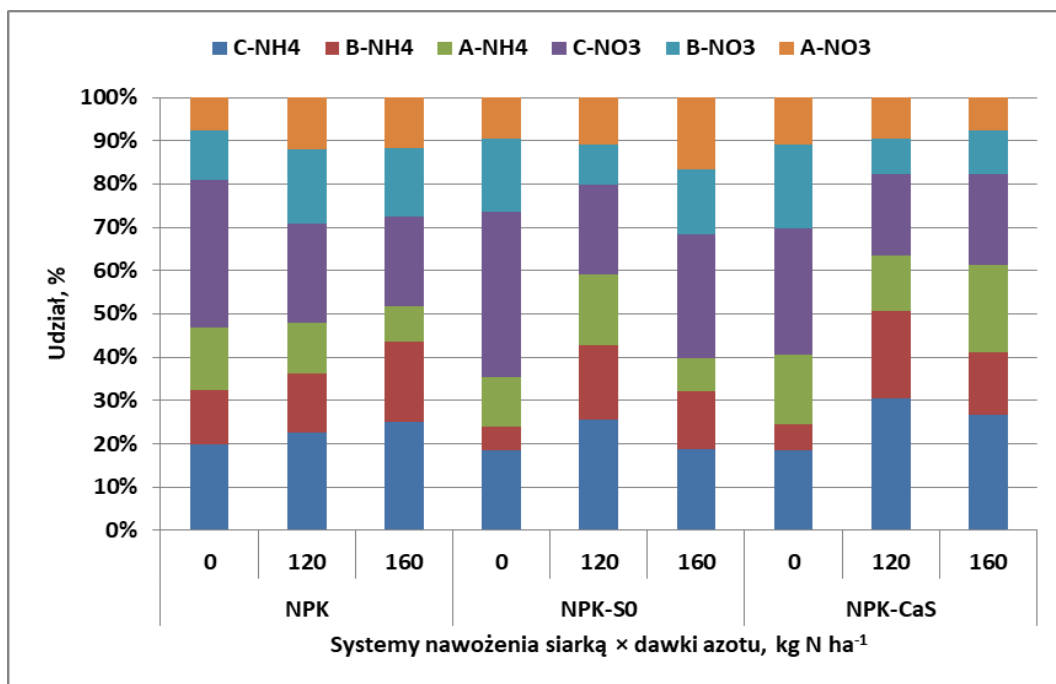
Źródło: opracowanie własne. ^ate same oznaczenia literowe oznaczają brak istotnych różnic między kolumnami; pionowy słupek w kolumnie określa wielkość standardowego błęd średniej.



Ryc. Z. 4.27. Wpływ współdziałania systemów nawożenia siarką i dawek azotu na strukturę procentową rozmieszczenia form azotu w glebie – doświadczenie nienawadniane
 Źródło: opracowanie własne; A, B, C – warstwy gleby, odpowiednio: 0-30, 30-60; 60-90 cm; NO₃ → N-NO₃ – azot azotanowy; NH₄ → N-NH₄ – azot amonowy.

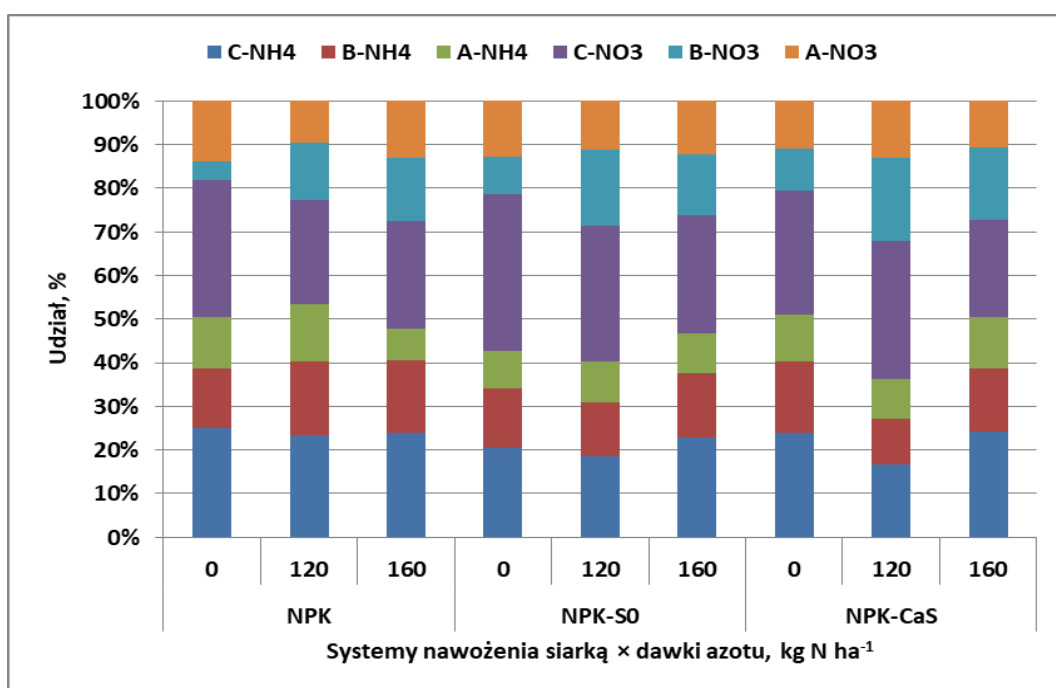


Ryc. Z.4.28. Wpływ współdziałania systemów nawożenia siarką i dawek azotu na strukturę procentową rozmieszczenia form azotu w glebie – doświadczenie nawadniane
 Źródło: opracowanie własne; A, B, C – warstwy gleby, odpowiednio: 0-30, 30-60; 60-90 cm; NO₃ → N-NO₃ – azot azotanowy; NH₄ → N-NH₄ – azot amonowy.



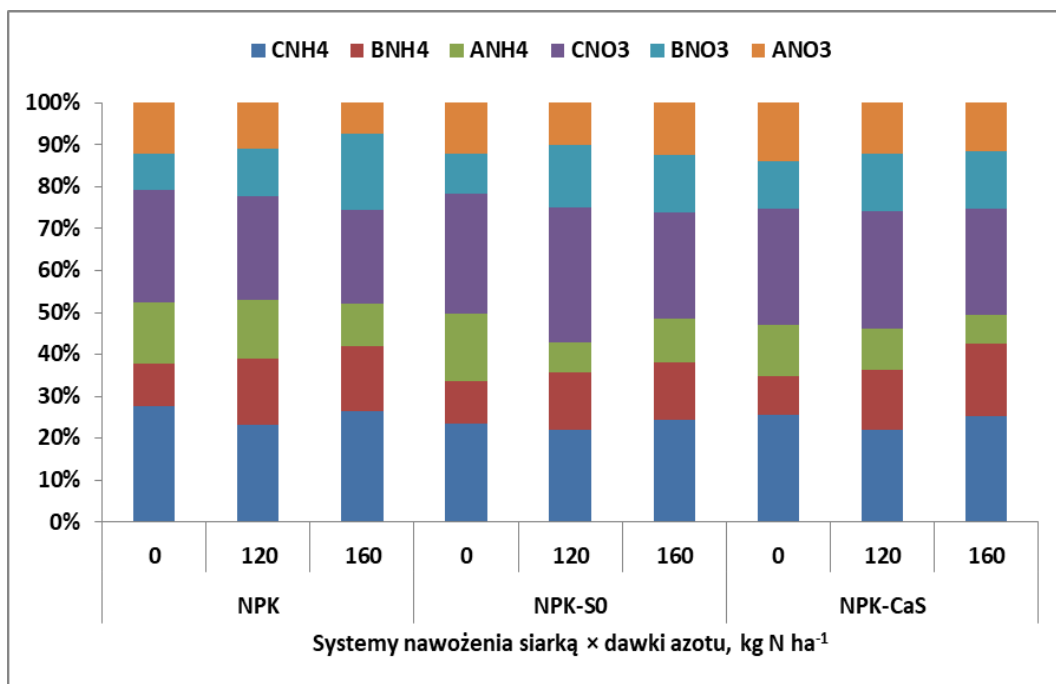
Ryc. Z4.29. Wpływ współdziałania systemów nawożenia siarką i dawek azotu na strukturę procentową rozmieszczenia form azotu w glebie w stadium BBCH 61 – doświadczenie nienawadniane

Źródło: opracowanie własne.



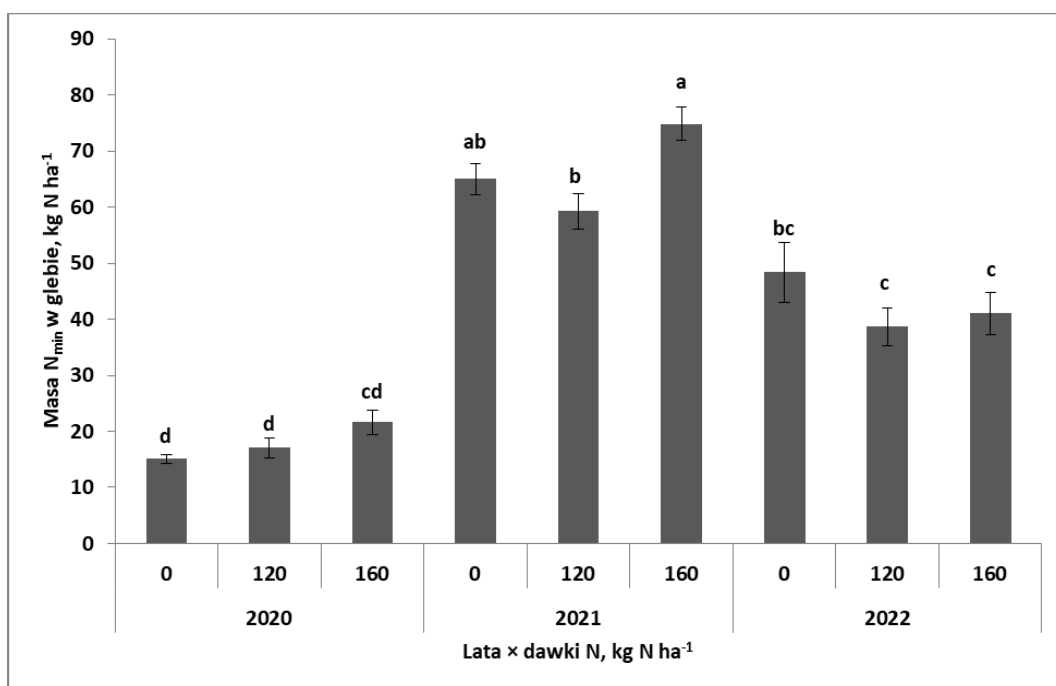
Ryc. Z4.30. Wpływ współdziałania systemów nawożenia siarką i dawek azotu na strukturę procentową rozmieszczenia form azotu w glebie – doświadczenie nawadniane

Źródło: opracowanie własne;



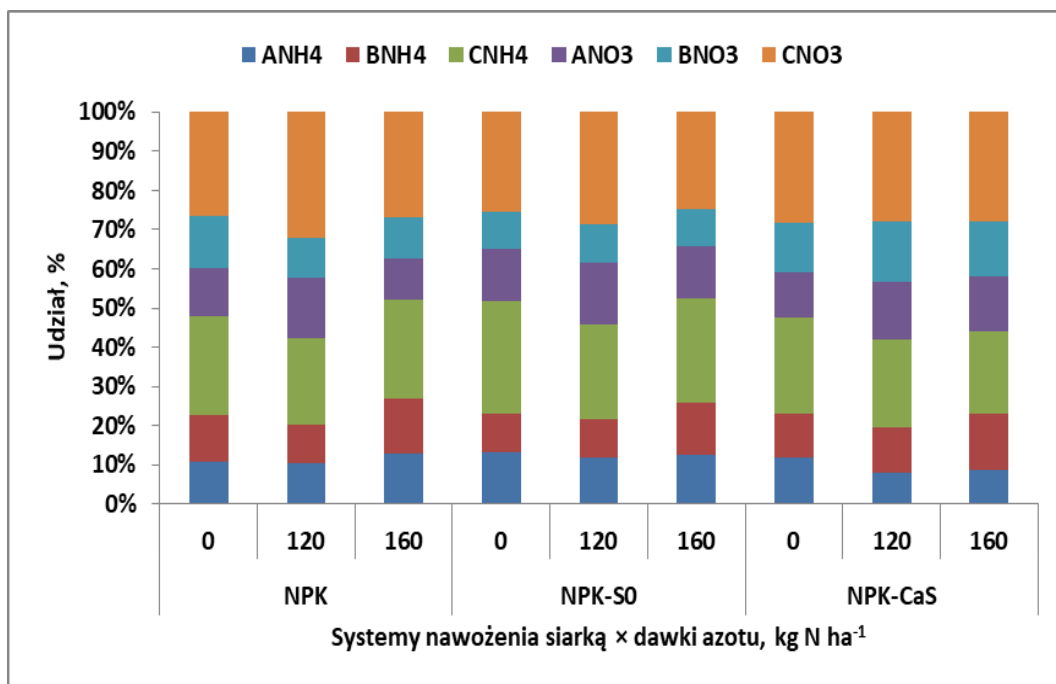
Ryc. Z4.31. Wpływ współdziałania systemów nawożenia siarką i dawek azotu na strukturę procentową rozmieszczenia form azotu w glebie w stadium BBCH 89 – doświadczenie nienawadniane

Źródło: opracowanie własne.



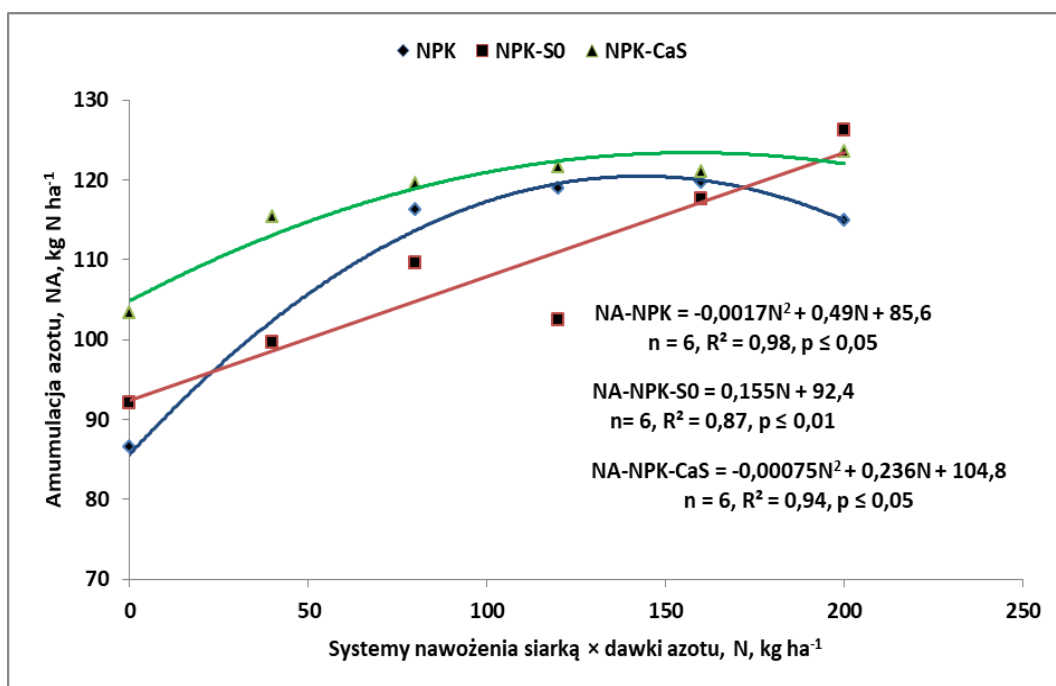
Ryc. Z4.32. Wpływ dawek azotu na tle lat na masę N_{min} w glebie w stadium BBCH 89 kukurydzy – doświadczenie nawadniane.

Źródło: opracowanie własne; ^ate same oznaczenia literowe oznaczają brak istotnych różnic między kolumnami; pionowy słupek w kolumnie określa wielkość standardowego błędu średniej.



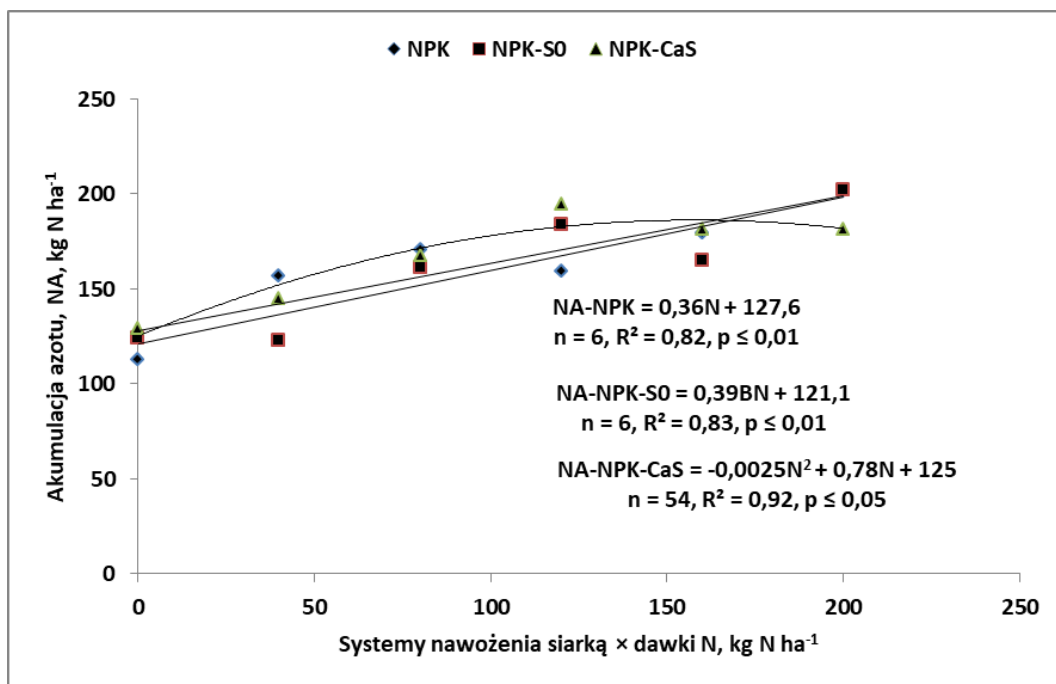
Ryc. Z4.33. Wpływ współdziałania systemów nawożenia siarką i dawek azotu na strukturę procentową rozmieszczenia form azotu w glebie w stadium BBCH 89 – doświadczenie nawadniane

Źródło: opracowanie własne.



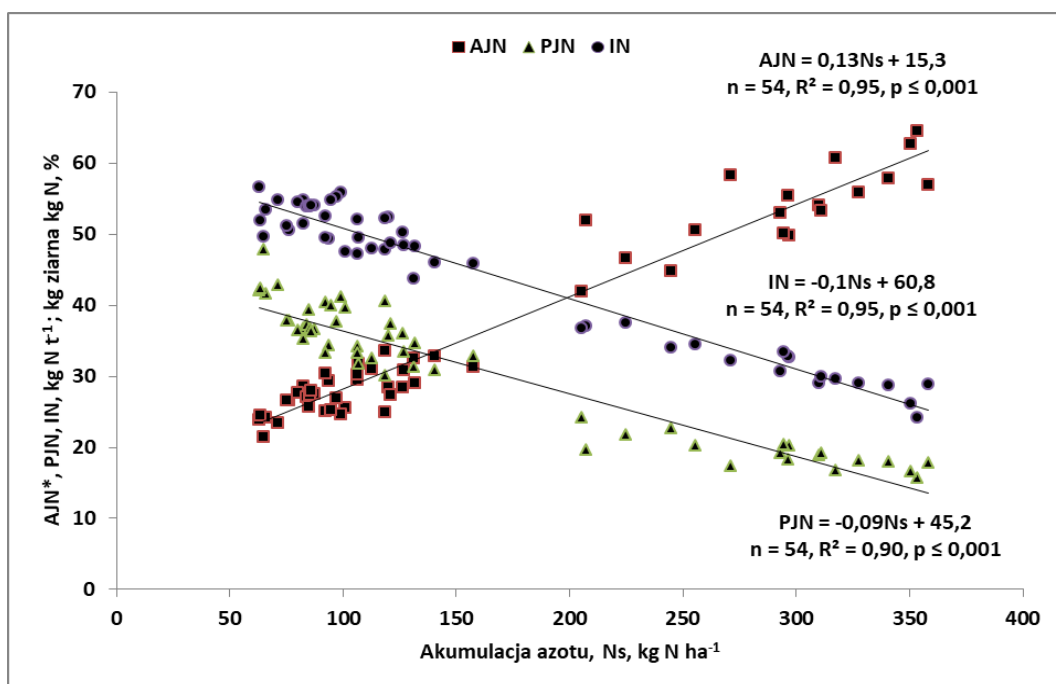
Ryc. Z4.34. Trendy akumulacji azotu w ziarnie dla systemów nawożenia siarką na tle dawek azotu – doświadczenie nienawadniane

Źródło: opracowanie własne.



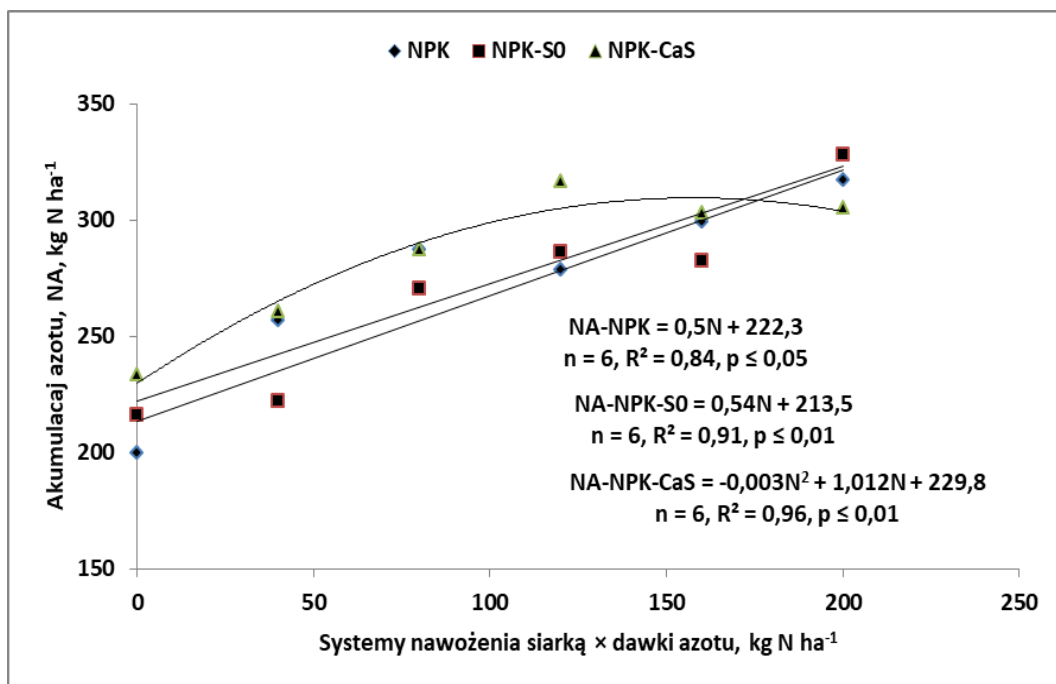
Ryc. Z4.35. Trendy akumulacji azotu w słomie dla systemów nawożenia siarką na tle dawek azotu – doświadczenie nienawadniane.

Źródło: opracowanie własne.



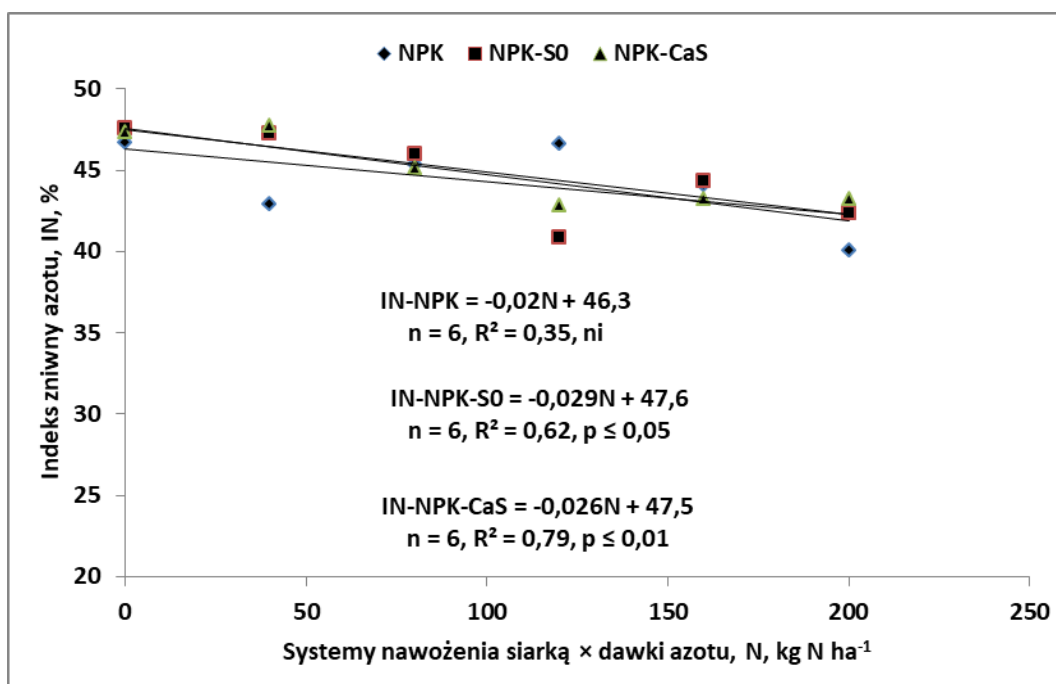
Ryc. Z4.36. Wpływ akumulacji azotu w słomie (Ns) na trendy wskaźników: AJN (akumulacja jednostkowa azotu), PjN (produktywność jednostkowa azotu), IN (indeks żniwny) – doświadczenie nienawadniane.

Źródło: opracowanie własne.



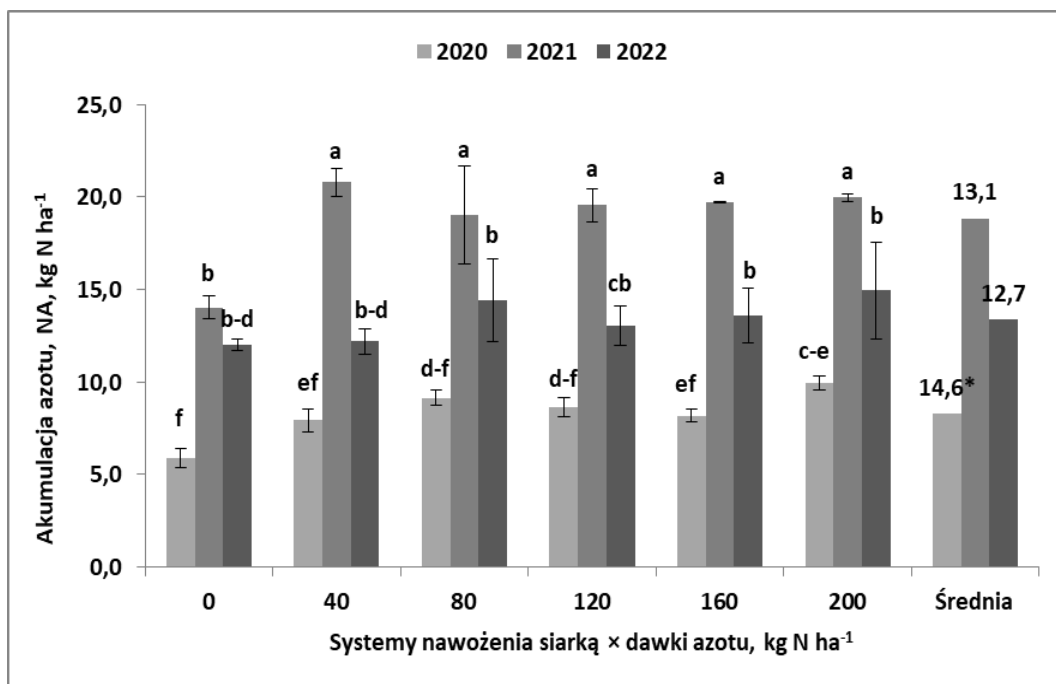
Ryc. Z4.37. Trendy akumulacji całkowitej azotu przez kukurydzę (NAc) dla systemów nawożenia siarką na tle dawek azotu – doświadczenie nienawadniane.

Źródło: opracowanie własne.

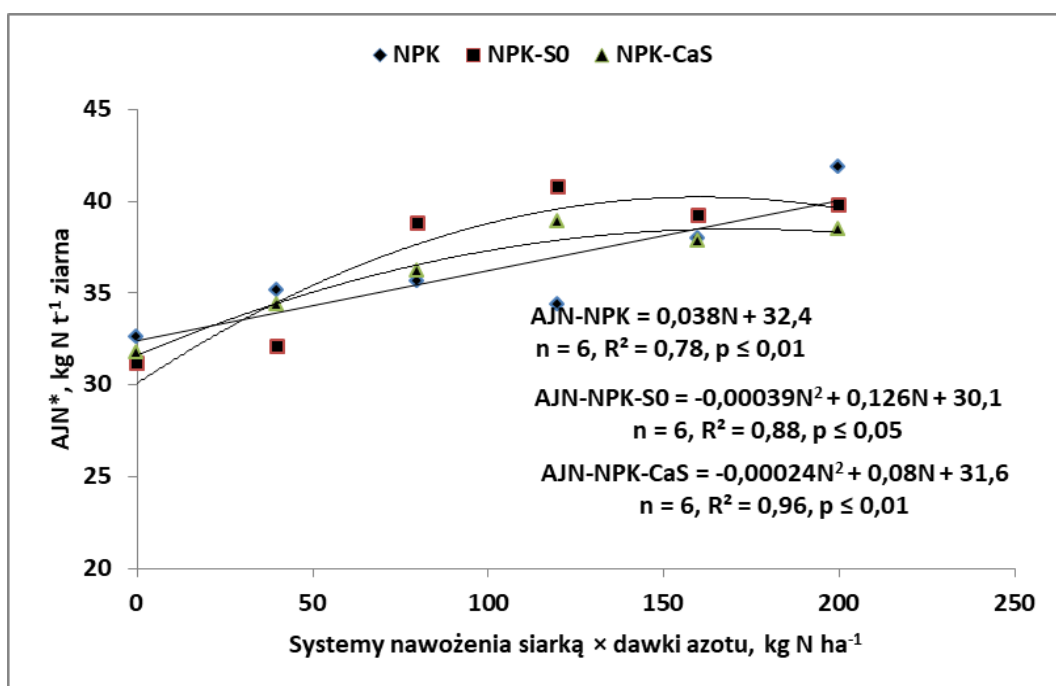


Ryc. Z4.38. Trendy indeksu zniwnego azotu (IN) dla systemów nawożenia siarką na tle dawek azotu – doświadczenie nienawadniane.

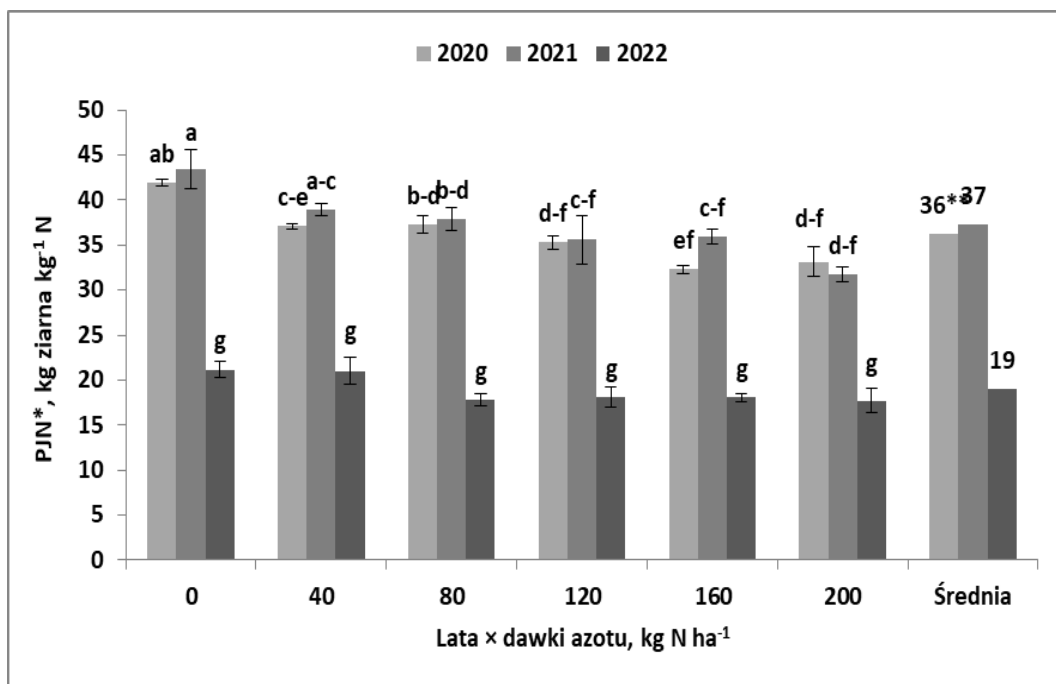
Źródło: opracowanie własne.



Ryc. Z4.39. Akumulacja azotu w stadium BBCH 14 kukurydzy (AN₁₄) w reakcji na dawki azotu i systemów nawożenia siarką – doświadczenie nienawadniane
 Źródło: opracowanie własne; *te same oznaczenia literowe oznaczają brak istotnych różnic między kolumnami; pionowy słupek w kolumnie określa wielkość standardowego błęd średniej;
 *średnia dla systemów nawożenia siarką.



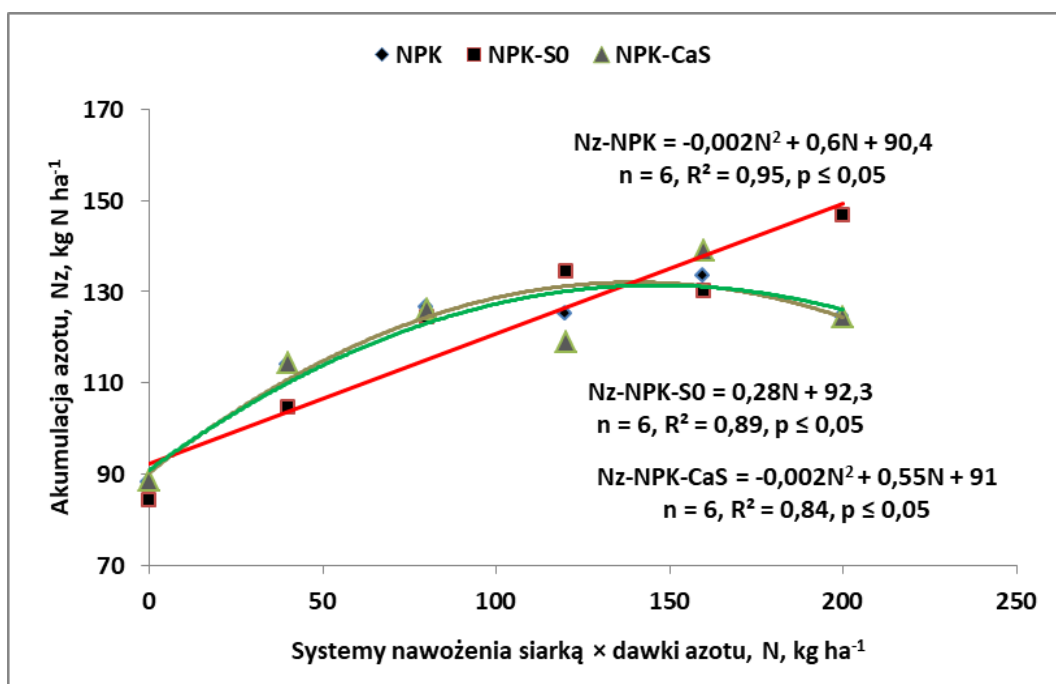
Ryc. Z4.40. Trendy wskaźnika akumulacji jednostkowej azotu przez kukurydżę (AJN) dla systemów nawożenia siarką na tle dawek azotu – doświadczenie nienawadniane;
 Źródło: opracowanie własne; *akumulacja jednostkowa azotu



Ryc. Z4.41. Produktywność jednostkowa azotu kukurydzy w latach na tle dawek azotu – doświadczenie nienawadniane.

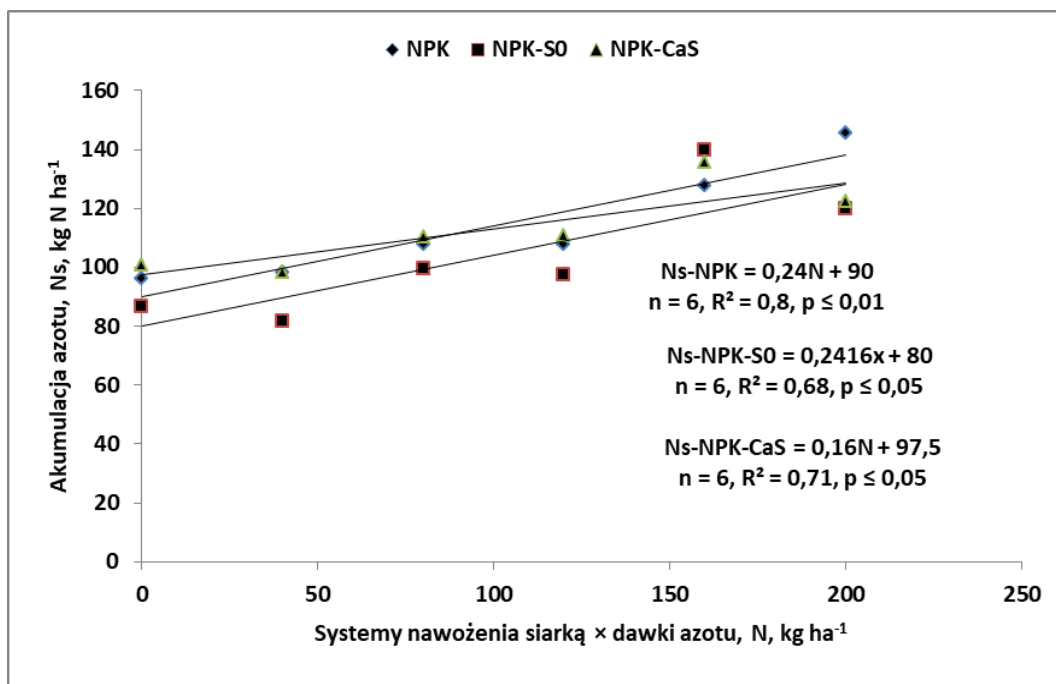
Źródło: opracowanie własne; *te same oznaczenia literowe oznaczają brak istotnych różnic między kolumnami; pionowy słupek w kolumnie określa wielkość standardowego błędu średniej;

*Produktywność jednostkowa azotu, **średnia dla systemów nawożenia siarką.



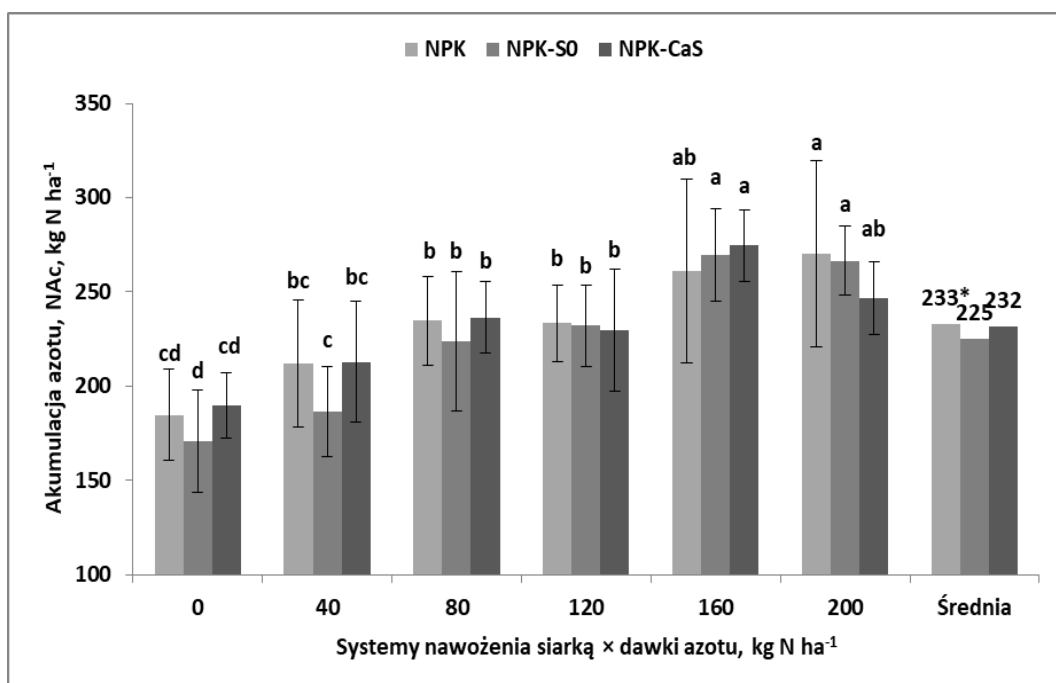
Ryc. Z4.42. Trendy akumulacji azotu w ziarnie (Nz) dla systemów nawożenia siarką na tle dawek azotu – doświadczenie nawadniane

Źródło: opracowanie własne.



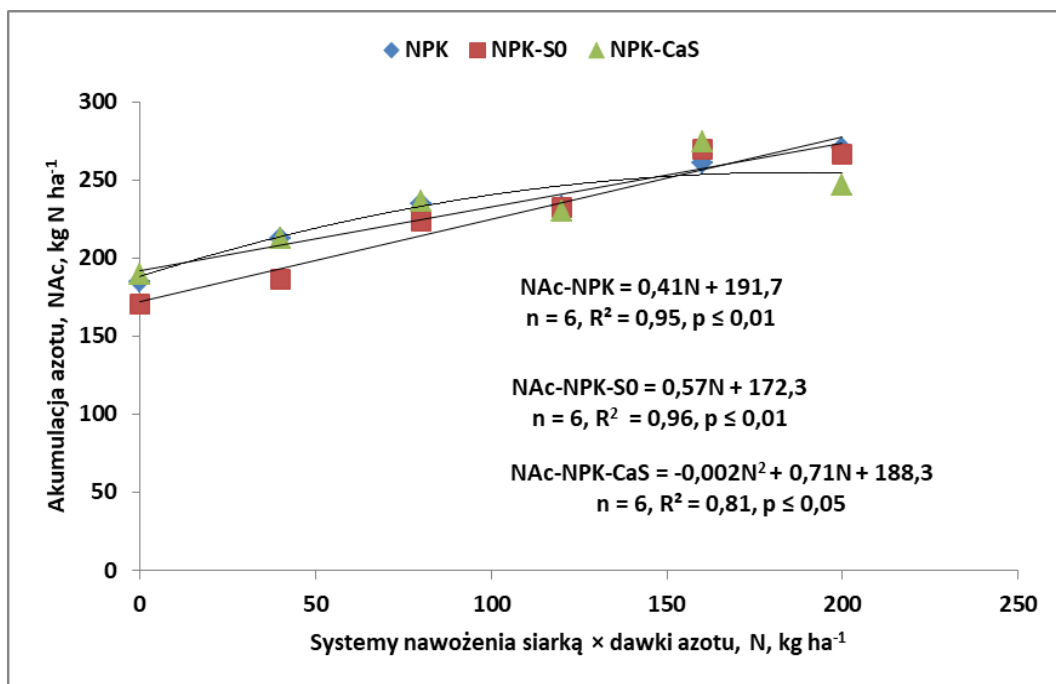
Ryc. Z4.43. Trendy akumulacji azotu w słomie kukurydzy (Ns) dla systemów nawożenia siarką na tle dawek azotu – doświadczenie nawadniane.

Źródło: opracowanie własne;

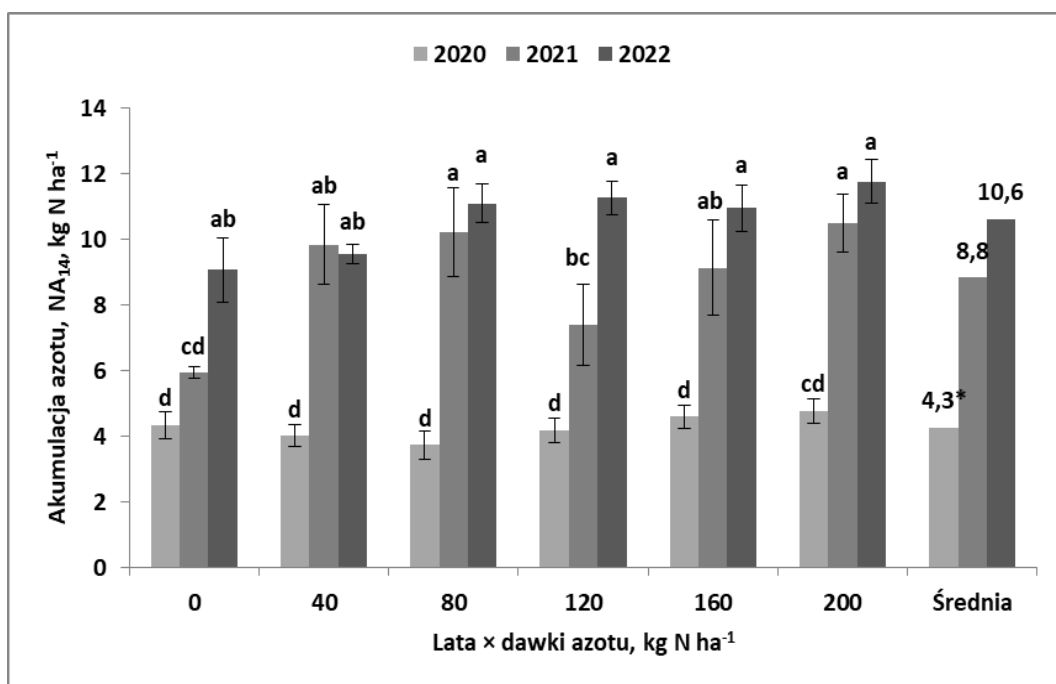


Ryc. Z4.44. Akumulacja całkowita azotu (NAC) przez kukurydź w reakcji na dawki azotu i systemy nawożenia siarką – doświadczenie nawadniane

Źródło: opracowanie własne; *średnia dla systemów nawożenia siarką.

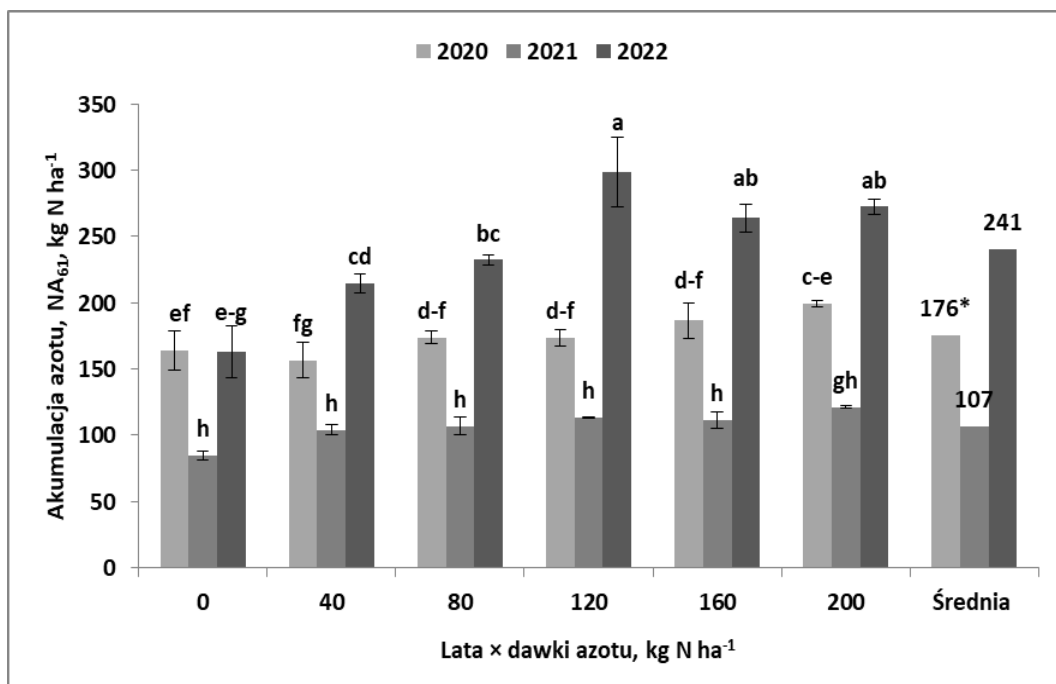


Ryc. Z4.45. Trendy akumulacji całkowitej azotu (NAc) przez kukurydzę dla systemów nawożenia siarką na tle dawek azotu na dawki azotu – doświadczenie nawadniane
Źródło: opracowanie własne.



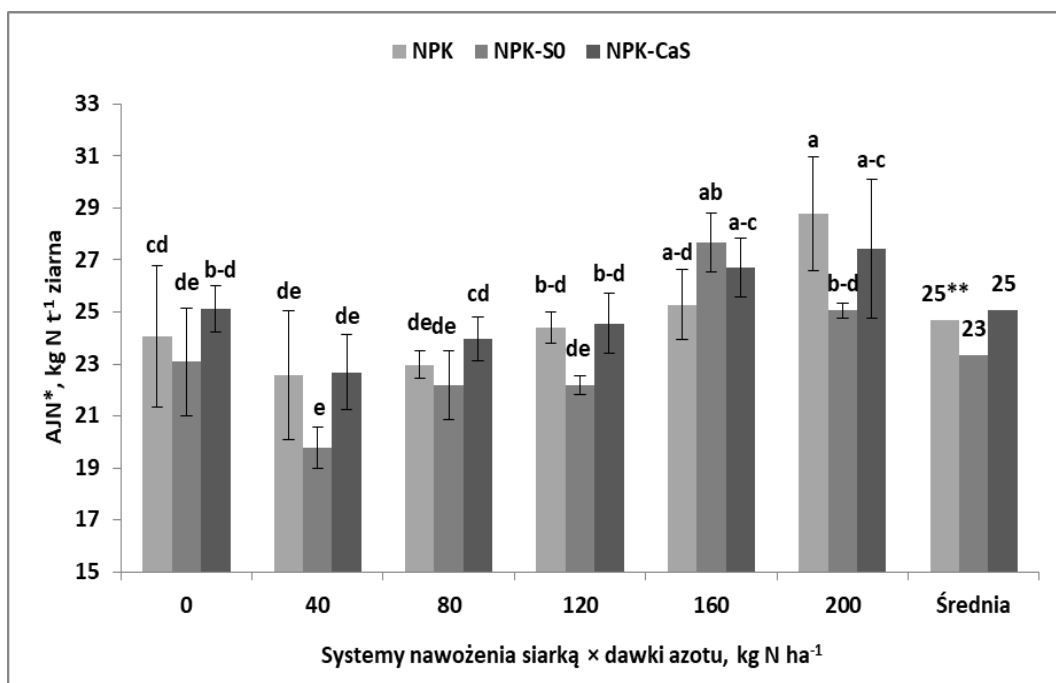
Ryc. Z4.46. Akumulacja azotu w stadium BBCH 14 (NA₁₄) kukurydzy w latach na tle dawek azotu – doświadczenie nawadniane

Źródło: opracowanie własne; ^ate same oznaczenia literowe oznaczają brak istotnych różnic między kolumnami; pionowy słupek w kolumnie określa wielkość standardowego błęd średniej, *średnia dla systemów nawożenia siarką.



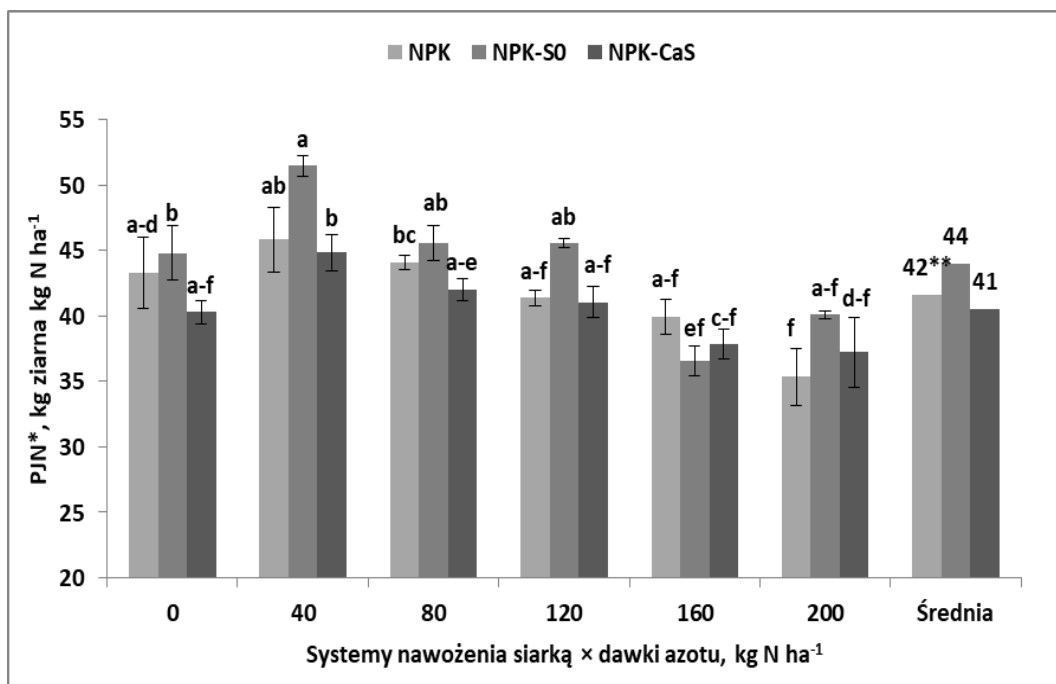
Ryc. Z4.47. Akumulacja azotu w stadium BBCH 61 (NA₆₁) kukurydzy w latach w reakcji na dawki azotu – doświadczenie nawadniane

Źródło: opracowanie własne; *te same oznaczenia literowe oznaczają brak istotnych różnic między kolumnami; pionowy słupek w kolumnie określa wielkość standardowego błędu średniej; *średnia dla systemów nawożenia siarką.

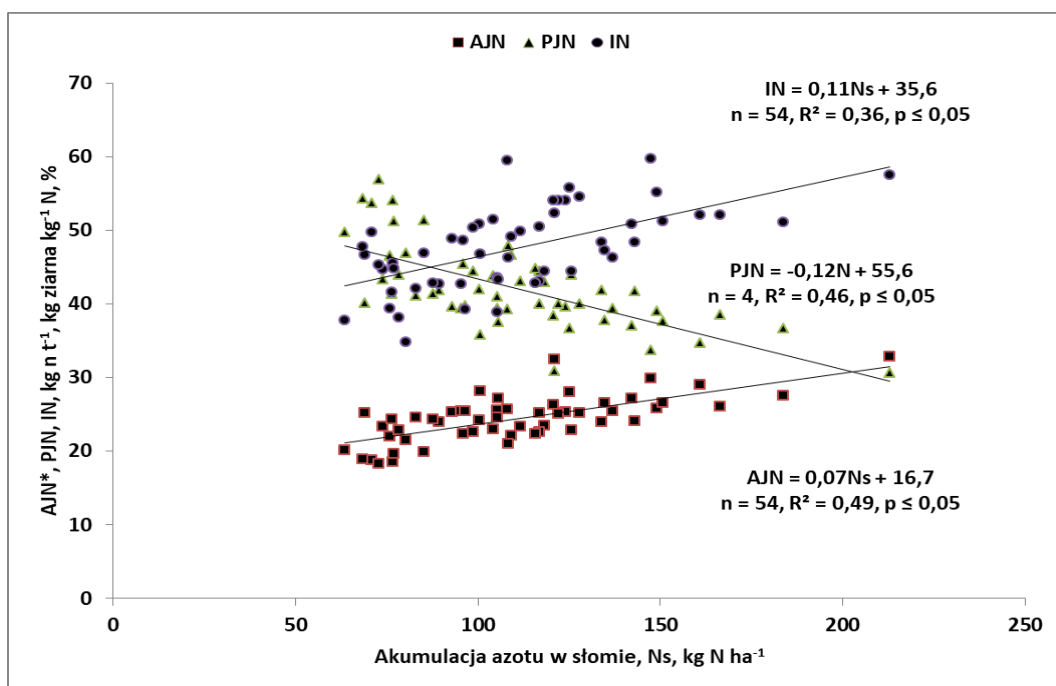


Ryc. Z4.48. Akumulacja jednostkowa azotu kukurydzy (AJN*) w reakcji na dawki azotu systemy nawożenia siarką – doświadczenie nawadniane

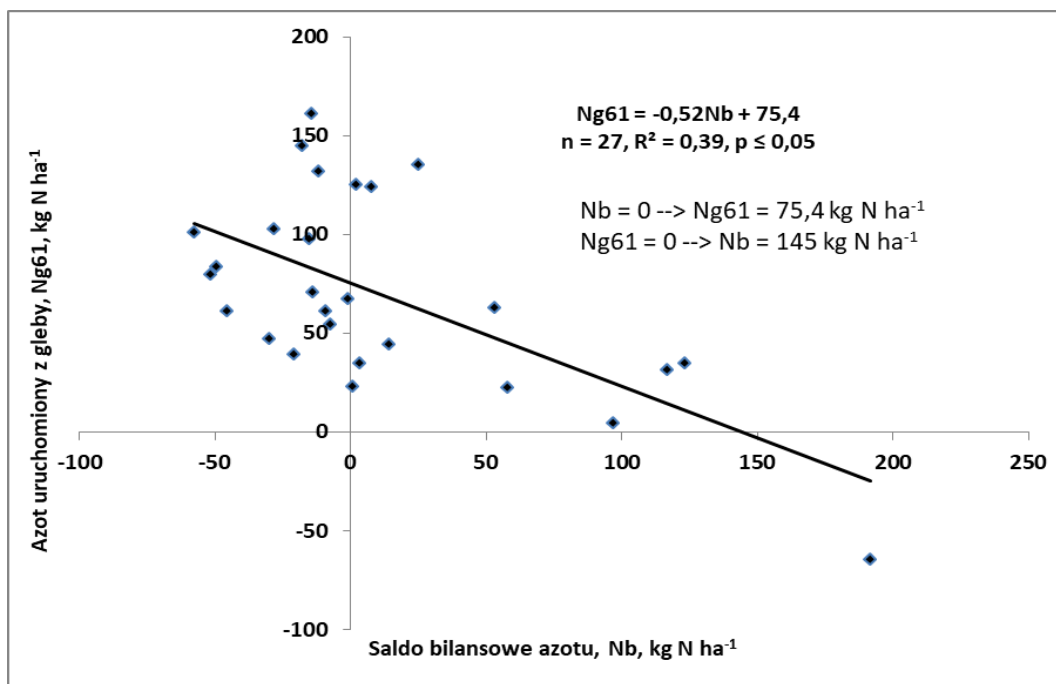
Źródło: opracowanie własne; *te same oznaczenia literowe oznaczają brak istotnych różnic między kolumnami; pionowy słupek w kolumnie określa wielkość standardowego błędu średniej; *akumulacja jednostkowa azotu, **średnia dla systemów nawożenia siarką.



Ryc. Z4.49. Produktywność jednostkowa azotu przez kukurydzę (PJN) dla systemów nawożenia siarką na tle dawek azotu – doświadczenie nawadniane;
 Źródło: opracowanie własne; ^ate same oznaczenia literowe oznaczają brak istotnych różnic między kolumnami; pionowy słupek w kolumnie określa wielkość standardowego błęd średniej;
 *produktywność jednostkowa azotu, **średnia dla systemów nawożenia siarką.

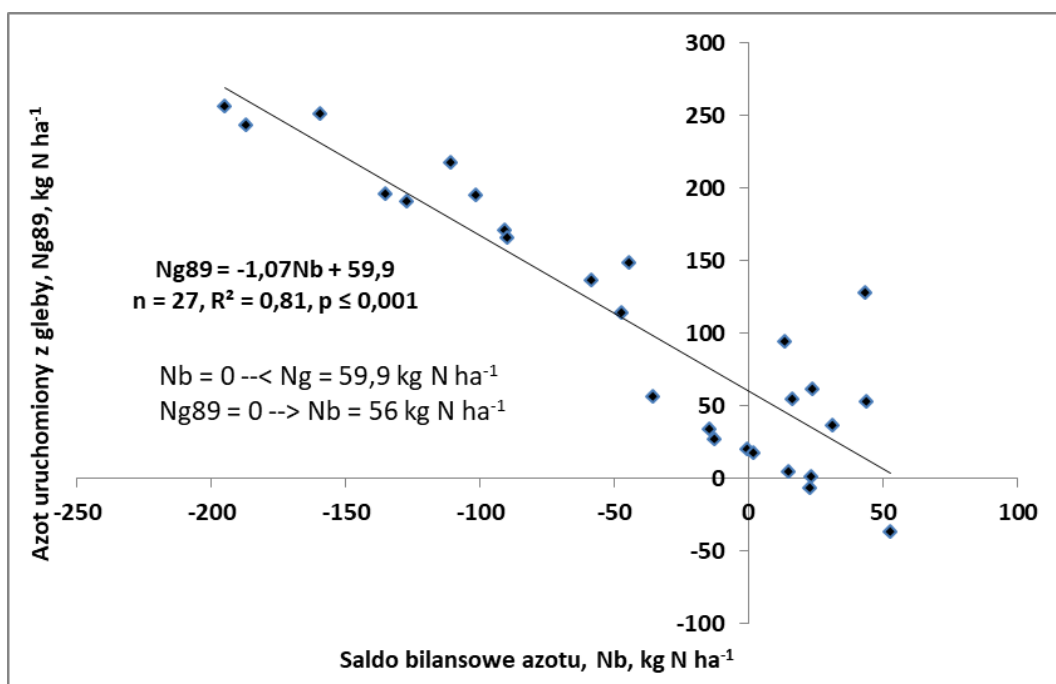


Ryc. Z4.50. Wpływ akumulacji N w słomie na trendy wskaźników: AJN (akumulacja jednostkowa azotu), PJN (produktywność jednostkowa azotu), IN (indeks żniwny) – doświadczenie nawadniane
 Źródło: opracowanie własne.



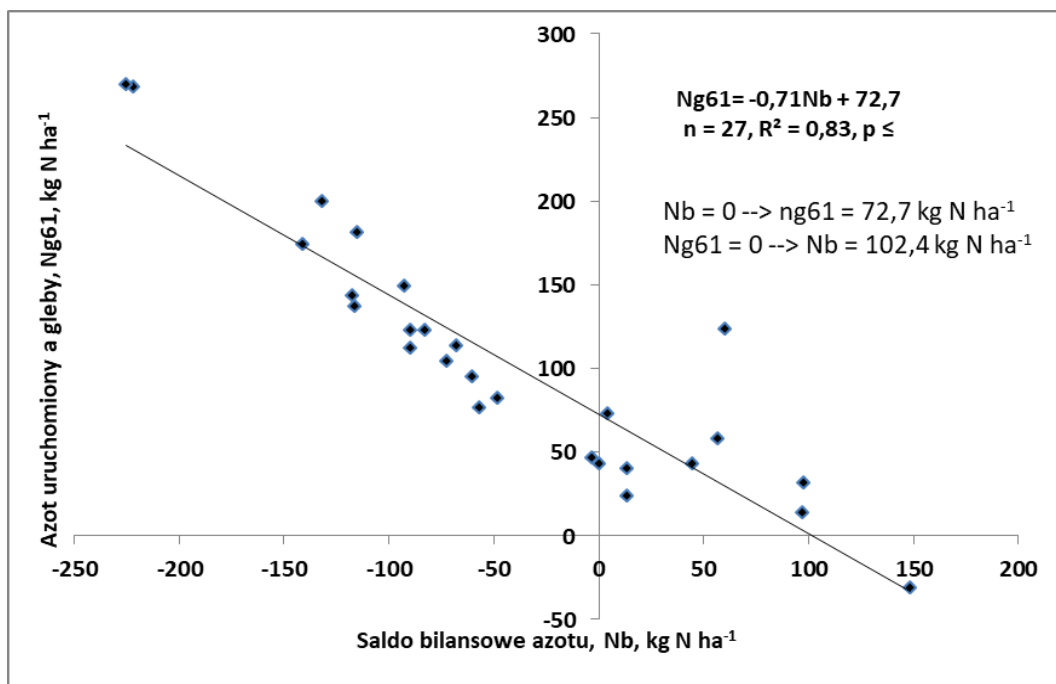
Ryc. Z4.51. Saldo bilansowe azotu w układzie gleba/roślina w okresie przed kwitnieniem (BBCH 15 – BBCH 61) a masa azotu uruchomiona z zasobów glebowych – doświadczenie nienawadniane.

Źródło: opracowanie własne



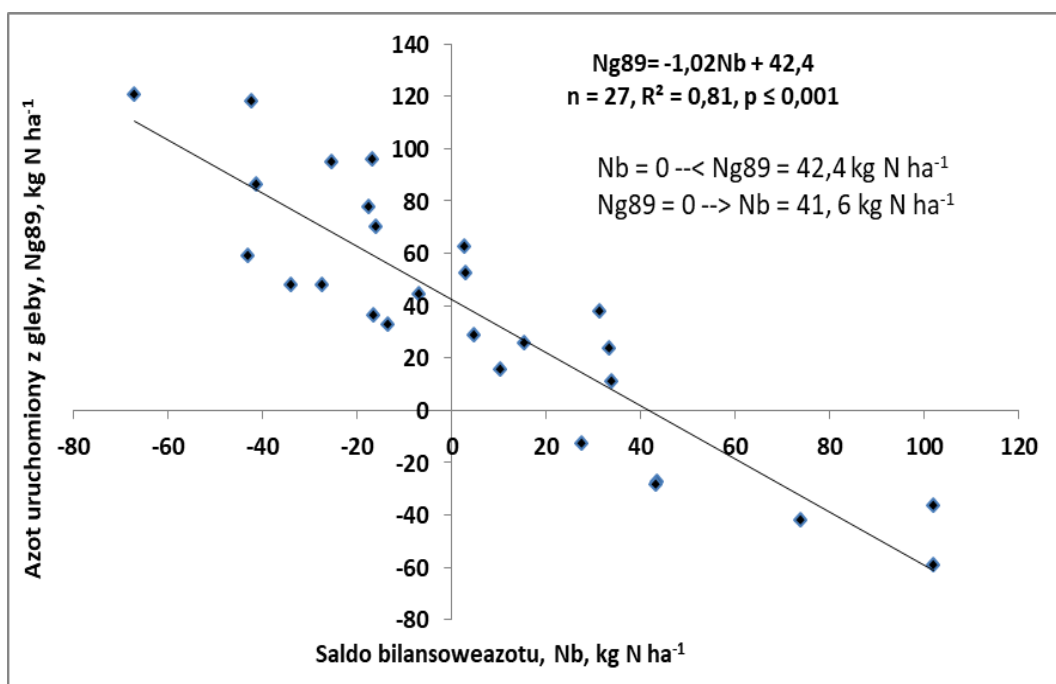
Ryc. Z.4.52. Saldo bilansowe azotu w układzie gleba/roślin w okresie nalewania ziarna (BBCH 61 – BBCH 89) a masa azotu uruchomiona z zasobów glebowych – doświadczenie nienawadniane.

Źródło: opracowanie własne.



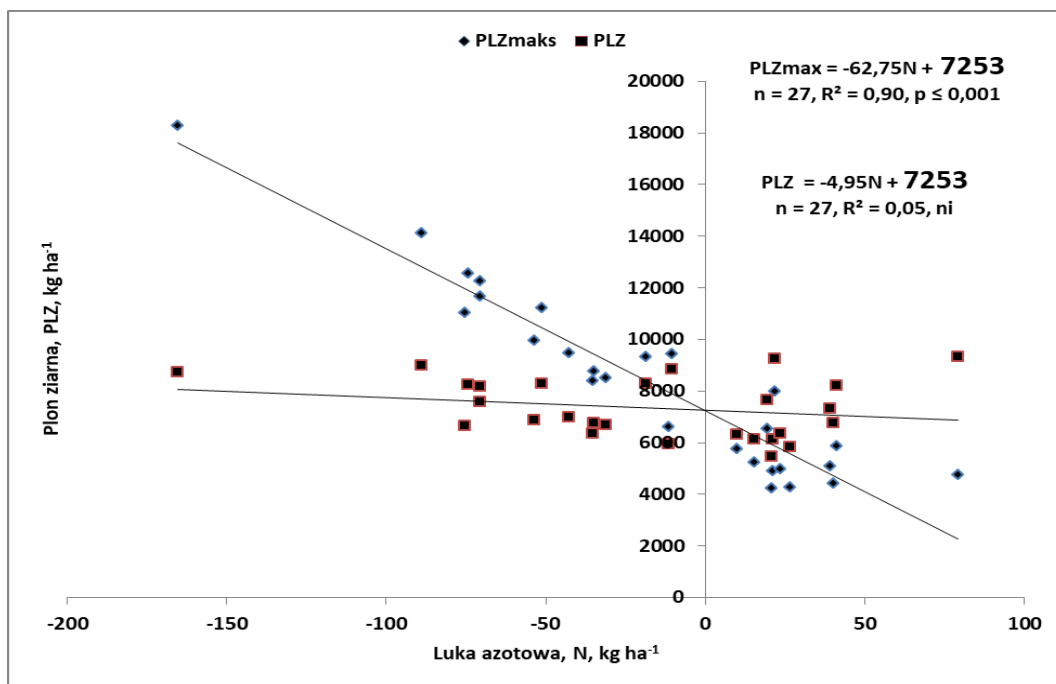
Ryc. Z.4.53. Saldo bilansowe azotu w układzie gleba/roślina w okresie przed kwitnieniem (BBCH 15 – BBCH 61) a masa azotu uruchomiona z zasobów glebowych – doświadczenie nawadniane.

Źródło: opracowanie własne.

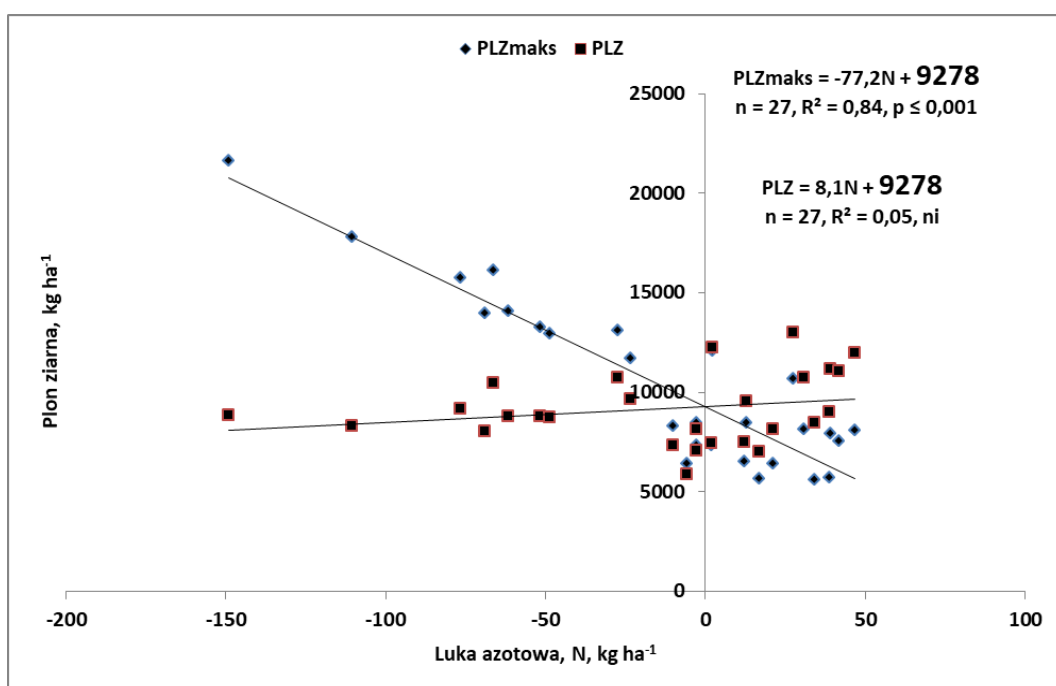


Ryc. Z.4.54. Saldo bilansowe azotu w układzie gleba/roślina w okresie nalewania ziarna (BBCH 61 – BBCH 89) a masa azotu uruchomiona z zasobów glebowych – doświadczenie nawadniane.

Źródło: opracowanie własne.



Ryc. Z5.1. Diagram plonu średniego maksymalnego – doświadczenie nienawadniane.
 Źródło: opracowanie własne.



Ryc. Z5.2. Diagram plonu średniego maksymalnego – doświadczenie nawadniane.
 Źródło: opracowanie własne.

10. Załączniki

Załącznik 2.1. Zabiegi agrotechniczne i terminy wykonania

Zabieg agrotechniczny	Sezon wegetacyjny		
	2020	2021	2022
Wysiew i wymieszanie z glebą: węglanu wapnia, siarki elementarnej, siarczanu wapnia, tlenku magnezu.	10.04.2020	12.04.2021	6.04.2022
Wysiew i wymieszanie z glebą: sól potasowa, fosforan amonu, mocznik	20.04.2020	19.04.2021	23.04.2022
Siew	25.04.2020	26.04.2021	25.04.2022
Zwalczanie chwastów Lumax 537,5 SE 2 l ha ⁻¹ + Nixon 50 SG 80 gr ha ⁻¹	20.05.2020	23.05.2021	21.05.2022
Wysiew mocznika	22.05.2020	24.05.2021	23.05.2022
Zbiór	04.11.2020	28.10.2021	29.10.2022

Źródło: opracowanie własne.

Załącznik 4.1a. Plon i elementy struktury plonu kukurydzy, doświadczenie nienawadniane – współdziałanie czynników doświadczalnych

Czynnik	Poziom czynnika	PLZ t ha ⁻¹	OB liczba m ⁻²	R liczba kolba ⁻¹	LZR liczba rząd ⁻¹	LZK liczba kolba ⁻¹	LZ liczba m ⁻²	MTZ g	WI % s.m.
Lata × SYS		8,8***	ns	2,9*	8,6***	6,9***	4,4***	3,4*	ns
Lata × ND		7,5***	ns	3,9***	6,2***	5,2***	4,9***	3,4***	ns
SYS × ND		4,6***	ns	4,1***	6,0***	7,7***	4,9***	4,7***	3,2**
Lata × SYS × ND		5,4***	ns	3,5***	4,5***	5,7***	4,5***	3,0***	ns

Źródło: opracowanie własne; ***, **, * - istotność na poziomie 0,001; 0,01; 0,05; ns – brak istotnego działania czynnika; ^a – ta sama litera w rzędzie oznacza brak istotnego zróżnicowania cechy w kolumnie dla danego czynnika. Legenda: PLZ - plon; OB – obsada roślin; R – liczba rzędów w kolbie; LZR – liczba ziarniaków w rzędzie; LZK – liczba ziarniaków w kolbie; LZ – liczba ziarniaków na m²; MTZ – masa 1000 ziarniaków; WI – wilgotność ziarna.

Załącznik 4.1b. Plon i elementy struktury plonu kukurydzy, doświadczenie nienawadniane , n = 54

Cechy	OB	R	LZR	LZK	MTZ	WI	LZ
PLZ	0,03	0,44**	0,71***	0,73***	0,61***	0,23	0,72***
OB	1,00	-0,38**	-0,22	-0,30*	0,30*	-0,35**	0,33*
R		1,00	0,40**	0,60***	0,19	0,30*	0,43**
LZR			1,00	0,97**	0,66**	0,16	0,57***
LZK				1,00	0,63***	0,22	0,61***
MTZ					1,00	0,07	0,52***
WI						1,00	0,06

Źródło: opracowanie własne; ***, **, * - istotność na poziomie 0,001; 0,01; 0,05; ns – brak istotnego działania czynnika; ^a – ta sama litera w rzędzie oznacza brak istotnego zróżnicowania cechy w kolumnie dla danego czynnika. Legenda: PLZ - plon; OB – obsada roślin; R – liczba rzędów w kolbie; LZR – liczba ziarniaków w rzędzie; LZK – liczba ziarniaków w kolbie; LZ – liczba ziarniaków na m²; MTZ – masa 1000 ziarniaków; WI – wilgotność ziarna.

Załącznik 4.2a. Plon i elementy struktury plonu kukurydzy, doświadczenie nawadniane – współdziałanie czynników doświadczalnych

Czynnik	Poziom czynnika	PLZ t ha ⁻¹	OB liczba m ⁻²	R liczba kolba ⁻¹	LZR liczba rząd ⁻¹	LZK liczba kolba ⁻¹	LZ liczba m ⁻²	MTZ g	WI % s.m.
Lata × SYS		3,6**	ns	4,7**	5,9***	3,7**	2,5*	4,1**	ns
Lata × ND		2,3*	ns	ns	2,1*	2,0*	ns	5,5***	ns
SYS × ND		2,1*	ns	3,9***	ns	ns	ns	3,3***	ns
Lata × SYS × ND		2,3**	ns	2,9***	ns	2,0*	ns	2,7***	ns

Źródło: opracowanie własne; ***, **, * - istotność na poziomie 0,001; 0,01; 0,05; ns – brak istotnego działania czynnika; ^a – ta sama litera w rzędzie oznacza brak istotnego zróżnicowania cechy w kolumnie dla danego czynnika. Legenda: PLZ - plon; OB – obsada roślin; R – liczba rzędów w kolbie; LZR – liczba ziarniaków w rzędzie; LZK – liczba ziarniaków w kolbie; LZ – liczba ziarniaków na m²; MTZ – masa 1000 ziarniaków; WI – wilgotność ziarna.

Załącznik 4.2b. Macierz korelacji dla elementów struktury plonu i plonu, doświadczenie nawadniane , n = 54

Cechy	OB.	R	LZR	LZK	LZ	MTZ	WI
PLZ	0,54***	0,21	0,28*	0,30*	0,87***	0,90***	-0,14
OB	1,00	-0,30*	-0,50***	-0,52***	0,49***	0,40**	-0,53***
R		1,00	0,31*	0,71***	0,42**	0,06	0,16
LZR			1,00	0,89***	0,39**	0,20	0,35*
LZK				1,00	0,48***	0,16	0,33*
LZ					1,00	0,58***	-0,21
MTZ						1,00	0,01

Źródło: opracowanie własne; ***, **, * - istotność na poziomie 0,001; 0,01; 0,05; ns – brak istotnego działania czynnika; ^a – ta sama litera w rzędzie oznacza brak istotnego zróżnicowania cechy w kolumnie dla danego czynnika. Legenda: PLZ - plon; OB – obsada roślin; R – liczba rzędów w kolbie; LZR – liczba ziarniaków w rzędzie; LZK – liczba ziarniaków w kolbie; LZ – liczba ziarniaków na m²; MTZ – masa 1000 ziarniaków; WI – wilgotność ziarna.

Załącznik 4.3a. Struktura biomasy kukurydzy – współdziałanie czynników doświadczalnych – doświadczenie nienawadniane

Czynnik	Poziom czynnika	MC ₁₄	BM ₁₄	MC ₆₁	BM ₆₁	MLP ₆₁	BLP ₆₁	MC ₈₉	Mko	Młó	PLZ	PL-Ł	PL-R	BC	IŻ %
Lata × SYS		3,6**	8,1***	ns	ns	3,0*	2,5*	ns	ns	ns	7,73***	6,7***	ns	8,7***	ns
Lata × ND		ns	2,3*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	7,43***	ns	ns	2,0*	2,3*
SYS × ND		ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	4,20***	3,0**	ns	3,2***	ns
Lata × SYS × ND		ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	5,1***	3,1***	2,0*	4,4***	2,8**

Źródło: opracowanie własne; ***, **, * - istotność na poziomie 0,001; 0,01; 0,05; ns – brak istotnego działania czynnika.

Załącznik 4.3b. Macierz korelacji dla składników biomasy kukurydzy – doświadczenie nienawadniane, n = 54

Cecha	BM ₁₄	MC ₆₁	BM ₆₁	MLP ₆₁	BLP ₆₁	MC ₈₉	Mko	Młó	PL-Ł	PL-R	BC	IŻ	PLZ
MC ₁₄	0,74***	-0,30*	-0,18	0,25	0,18	0,70***	0,12	0,73***	0,67***	0,03	0,63***	0,10	0,53***
BM ₁₄	1,00	-0,26	-0,47***	-0,21	-0,18	0,74***	-0,01	0,82***	0,60***	-0,13	0,51***	-0,20	0,42**
MC ₆₁		1,00	0,53***	-0,43**	-0,58***	-0,09	-0,16	-0,09	-0,50***	-0,41**	-0,53***	-0,61***	-0,20
BM ₆₁			1,00	0,34*	0,26	-0,23	0,31*	-0,35	-0,20	0,14	-0,13	0,22	-0,03
MLP ₆₁				1,00	0,91***	-0,09	0,39**	-0,19	0,36**	0,49***	0,45**	0,79***	0,21
BLP ₆₁					1,00	-0,10	0,50***	-0,21	0,39**	0,59***	0,48***	0,86***	0,20
MC ₈₉						1,00	0,40**	0,96***	0,80***	0,13	0,73***	-0,18	0,64***
Mko							1,00	0,17	0,55***	0,77***	0,63***	0,51***	0,48***
Młó								1,00	0,72***	-0,08	0,61***	-0,31*	0,54***
PL-Ł									1,00	0,48***	0,97***	0,33*	0,70***
PL-R										1,00	0,58***	0,70***	0,37***
BC											1,00	0,46***	0,80***
IŻ												1,00	0,26

Źródło: opracowanie własne; ***, **, * – istotność korelacji między cechami na poziomie 0,001; 0,01; 0,05; brak oznaczenia – brak istotnej korelacji między cechami.

Legenda: MC₁₄ – masa świeża roślin w stadium BBCH 14; BM₁₄ – sucha masa roślin w stadium BBCH 14; MC₆₁ – świeża masa roślin w stadium BBCH 61; BM₆₁ – sucha masa roślin w stadium BBCH 61; MLP₆₁ – świeża masa liścia podkolbowego w stadium BBCH 61; BLP₆₁ – sucha masa liść podkolbowego w stadium BBCH 61; MC₈₉ – świeża masa roślin w stadium BBCH 89; Mko – świeża masa kolb w BBCH 89; Młó – świeża masa łodyg w BBCH 89; PLZ – plon ziarna; PL-Ł – sucha masa łodyg; PL-R – sucha masa rdzenia; BC – masa sucha całkowita; IŻ – indeks żniwny.

Załącznik 4.4a. Struktura biomasy kukurydzy – współdziałanie czynników doświadczalnych – doświadczenie nawadniane

Czynnik	Poziom czynnika	MC ₁₄	BM ₁₄	MC ₆₁	BM ₆₁	MLP ₆₁	BLP ₆₁	MC ₈₉	Mko	Mło	PLZ	PL-Ł	PL-R	BC	IŻ %
Lata × SYS		ns	3,4*	2,9*	4,4**	ns	ns	ns	4,2**	ns	3,6**	ns	ns	3,5**	ns
Lata × ND		3,2***	3,1**	2,2*	2,7**	ns	ns	2,5*	ns	3,6***	2,2*	1,9*	ns	1,9*	2,9*
SYS × ND		ns	ns	2,2*	ns	ns	ns	2,1*	ns	3,4***	2,1*	ns	ns	ns	3,2***
Lata × SYS × ND		ns	1,9*	ns	ns	ns	ns	3,8***	1,8*	4,8***	2,3**	2,5***	ns	2,0*	3,8***

Źródło: opracowanie własne; ***, **, * - istotność na poziomie 0,001; 0,01; 0,05; ns – brak istotnego działania czynnika.

Załącznik 4.4b. Macierz korelacji dla składników biomasy kukurydzy – doświadczenie nawadniane, n = 54

Cecha	BM ₁₄	MC ₆₁	BM ₆₁	MLP ₆₁	BLP ₆₁	MC ₆₁	Mko	Mło	PL-Ł	PL-R	BC	IŻ	PLZ
MC ₁₄	0,98***	0,19	0,37**	-0,44**	-0,58***	-0,02	-0,56***	0,33*	0,74***	0,07	0,75***	-0,23	0,59***
BM ₁₄	1,00	0,15	0,35*	-0,46***	-0,59***	-0,06	-0,59***	0,29*	0,68***	0,02	0,69***	-0,21	0,54***
MC ₆₁		1,00	0,81***	0,63***	0,59***	0,72***	0,49***	0,69***	0,28*	0,24	0,45**	0,30*	0,61***
BM ₆₁			1,00	0,35**	0,38**	0,69***	0,33*	0,75***	0,48**	0,08	0,58***	0,14	0,65***
MLP ₆₁				1,00	0,93***	0,54***	0,70***	0,31*	-0,31*	0,09	-0,19	0,41**	0,06
BLP ₆₁					1,00	0,6***	0,83***	0,30*	-0,39**	0,07	-0,28*	0,41**	-0,02
MC ₆₁						1,00	0,76***	0,91***	0,29***	0,20	0,43**	0,21	0,54***
Mko							1,00	0,42**	-0,22	0,16	-0,11	0,32*	0,09
Mło								1,00	0,54***	0,17	0,66***	0,09	0,69***
PL-Ł									1,00	0,18	0,94***	-0,52***	0,60***
PL-R										1,00	0,28*	0,03	0,28*
BC											1,00	-0,21	0,83***
IŻ												1,00	0,36**

Źródło: opracowanie własne; ***, **, * – istotność korelacji między cechami na poziomie 0,001; 0,01; 0,05; brak oznaczenia – brak istotnej korelacji między cechami.

Legenda: MC₁₄ – masa świeża roślin w stadium BBCH 14; BM₁₄ – sucha masa roślin w stadium BBCH 14; MC₆₁ – świeża masa roślin w stadium BBCH 61; BM₆₁ – sucha masa roślin w stadium BBCH 61; MLP₆₁ – świeża masa liścia podkolbowego w stadium BBCH 61; BLP₆₁ – sucha masa liść podkolbowego w stadium BBCH 61; MC₈₉ – świeża masa roślin w stadium BBCH 89; Mko – świeża masa kolb w BBCH 89; Mło – świeża masa łodyg w BBCH 89; PLZ – plon ziarna; PL-Ł – sucha masa łodyg; PL-R – sucha masa rdzenia; BC – masa sucha całkowita; IŻ – indeks żniwny.

Załącznik 4.5a. Zawartość składników pokarmowych w kukurydzy w stadium BBCH 14, współdziałania – doświadczenie nienawadniane

Czynnik	Poziom czynnika	N	P	K	Na	Mg	Ca	Fe	Mn	Zn	Cu
	Lata × SYS	2,5*	30***	12,7***	13,0***	18,7***	104***	150***	34,0***	5,1***	22,6***
	Lata × ND	ns	3,2***	ns	3,8***	3,6***	12,8***	3,7***	11,6***	2,4*	10,8***
	SYS × ND	ns	2,3*	ns	2,6**	2,3*	4,4***	2,3***	13,0***	ns	8,7***
	Lata × SYS × ND	ns	2,4**	ns	2,2*	ns	4,6***	3,0***	4,0***	ns	6,1***

Źródło: opracowanie własne; ***, **, * - istotność na poziomie 0,001; 0,01; 0,05; ns – brak istotnego działania czynnika.

Załącznik 4.5b. Macierz korelacji między składnikami pokarmowymi w stadium BBCH 14 a biomasą kukurydzy w BBCH 15 i plonem ziarna, doświadczenie nienawadniane, n = 54

Cecha	P	K	Na	Mg	Ca	Fe	Mn	Zn	Cu	BM ₁₄	PLZ
N	-0,27*	0,04	0,24	0,08	-0,27	0,36**	0,24	0,44**	0,07	-0,13	0,33*
P	1,00	-0,08	-0,46***	-0,56***	0,53***	-0,72***	0,32*	0,19	0,08	0,73***	0,19
K		1,00	0,18	-0,49***	0,05	0,52***	-0,21	0,08	0,66***	0,31*	0,30
Na			1,00	0,34*	-0,35**	0,74***	-0,17	-0,01	-0,03	-0,43**	0,07
Mg				1,00	-0,63***	0,28***	-0,10	-0,18	-0,48***	-0,86***	-0,50***
Ca					1,00	-0,46**	-0,03	-0,14	0,08	0,60***	0,13
Fe						1,00	-0,27	0,01	0,15	-0,47***	0,08
Mn							1,00	0,76***	-0,10	0,18	0,28*
Zn								1,00	0,15	0,17	0,39**
Cu									1,00	0,36**	0,31*

Źródło: opracowanie własne; ***, **, * - istotność korelacji między cechami na poziomie 0,001; 0,01; 0,05; brak oznaczenia – brak istotnej korelacji między cechami.

Załącznik 4.6a. Zawartość składników pokarmowych w kukurydzy w stadium BBCH 14, współdziałania – doświadczenie nawadniane

Czynnik	Poziom czynnika	N	P	K	Na	Mg	Ca	Fe	Mn	Zn	Cu
	Lata × SYS	4,6***	ns	ns	ns	2,8*	ns	ns	2,5*	ns	2,6*
	Lata × ND	ns	ns	ns	3,1**	2,2*	3,3**	ns	8,6***	3,0**	2,3*
	SYS × ND	ns	ns	ns	0,7	ns	2,2*	ns	2,1*	ns	3,3***
	Lata × SYS × ND	ns	ns	ns	1,9*	ns	2,7***	ns	2,9***	ns	2,7***

Źródło: opracowanie własne; ***, **, * - istotność na poziomie 0,001; 0,01; 0,05; ns – brak istotnego działania czynnika.

Załącznik 4.6b. Macierz korelacji między składnikami pokarmowymi w stadium BBCH 14 a biomasa kukurydzy w BBCH 14 i plonem ziarna, doświadczenie nawadniane, n = 54

Cecha	P	K	Na	Mg	Ca	Fe	Mn	Zn	Cu	BM ₁₄	PLZ
N	0,0163	-0,33**	0,41**	0,45**	0,16	-0,12	0,20	0,11	-0,35**	-0,49***	-0,10
P	1,00	-0,81***	0,04	-0,52***	-0,79***	-0,86***	0,69***	0,79***	0,20	-0,02	-0,45**
K		1,00	-0,26	0,15	0,59***	0,80***	-0,56***	-0,67***	0,11	0,47***	0,64***
Na			1,00	0,53***	0,15	-0,01	0,19	0,07	-0,22	-0,51***	-0,33*
Mg				1,00	0,66***	0,44**	-0,43**	-0,55***	-0,39**	-0,60***	-0,07
Ca					1,00	0,76***	-0,58***	-0,72***	-0,11	-0,14	0,37**
Fe						1,00	-0,60***	-0,69***	-0,01	0,14	0,51***
Mn							1,00	0,93***	0,20	0,07	-0,14
Zn								1,00	0,26	0,09	-0,18
Cu									1,00	0,37**	0,14
BM ₁₅										1,00	0,54***

Źródło: opracowanie własne; ***, **, * - istotność korelacji między cechami na poziomie 0,001; 0,01; 0,05; brak oznaczenia – brak istotnej korelacji między cechami.

Załącznik 4.7a. Zawartość składników pokarmowych w liściu podkolbowym kukurydzy i indeksy odżywienia w stadium BBCH 61, współdziałania – doświadczenie nienawadniane

Czynnik	Poziom Czynnika	N	S	P	K	Na	Mg	Ca	Fe	Mn	Zn	Cu	SPAD	N/S
	Lata × SYS	ns	ns	ns	ns	2,8*	ns	ns	3,8**	ns	ns	ns	ns	ns
	Lata × ND	2,0*	ns	ns	5,1***	3,9***	ns	ns	ns	6,3***	2,2**	2,8*	10,9***	ns
	SYS × ND	ns	ns	ns	6,9***	3,4***	ns	ns	4,4***	2,8*	ns	ns	ns	ns
	Lata × SYS × ND	ns	ns	ns	6,4***	4,6***	ns	ns	3,7***	ns	1,7*	ns	ns	ns

Źródło: opracowanie własne; ***, **, * - istotność na poziomie 0,001; 0,01; 0,05; ns – brak istotnego działania czynnika; SPAD – wskaźnik odczytu N-testera; N/S – indeks – wartość niemianowana.

Załącznik 4.7b. Macierz korelacji między składnikami pokarmowymi w stadium BBCH 65 a plonem ziarna i indeksami odżywienia doświadczenie nienawadniane, n = 54

	S	P	K	Na	Mg	Ca	Fe	Mn	Zn	Cu	SPAD	N/S	PLZ
N	0,83***	-0,49***	0,63***	0,79***	0,54***	0,01	-0,51***	-0,37**	0,37**	-0,71***	0,32*	-0,65***	0,24
S	1,00	-0,61***	0,8***	0,86***	0,39**	-0,35**	-0,49***	-0,40**	0,51***	-0,63***	0,58***	-0,85***	0,31*
P		1,00	-0,63***	-0,62***	-0,21	0,36**	0,41**	0,36**	-0,26	0,59***	-0,28*	0,53***	-0,18
K			1,00	0,80***	0,24	-0,60***	-0,67***	-0,18	0,60***	-0,39**	0,65***	-0,57***	0,38**
Na				1,00	0,50***	-0,25	-0,47***	-0,45**	0,44**	-0,67***	0,36**	-0,74***	0,26
Mg					1,00	0,25	-0,19	-0,40**	0,09	-0,42**	-0,05	-0,42**	-0,02
Ca						1,00	0,19	-0,17	-0,47***	-0,10	-0,67***	0,12	-0,42**
Fe							1,00	0,26	-0,25	0,47***	-0,20	0,41**	-0,02
Mn								1,00	0,40**	0,74***	0,22	0,60***	0,30*
Zn									1,00	0,12	0,67***	-0,25	0,50***
Cu										1,00	0,11	0,65***	0,10
SPAD											1,00	-0,25	0,57***
N/S												1,00	-0,05

Źródło: opracowanie własne; ***, **, * - istotność na poziomie 0,001; 0,01; 0,05; brak oznaczenia – brak istotnego działania czynnika; SPAD – wskaźnik odczytu N-testera; N/S – indeks – wartość niemianowana.

Załącznik 4.8a. Zawartość składników pokarmowych w liściu podkolbowym kukurydzy i indeksy odżywienia w stadium BBCH 65, współdziałania – doświadczenie nawadniane

Czynnik	Poziom Czynnika	N	S	P	K	Na	Mg	Ca	Fe	Mn	Zn	Cu	SPAD	N/S
Lata × SYS		4,4**	ns	2,6*	ns	ns	ns	ns	ns	3,3*	ns	ns	ns	ns
Lata × ND		ns	ns	ns	ns	ns	ns	2,8**	ns	5,2***	ns	ns	6,8***	ns
SYS × ND		ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	1,9*	ns	ns
Lata × SYS × ND		ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	2,7***	ns	ns	ns	ns

Źródło: opracowanie własne; ***, **, * - istotność na poziomie 0,001; 0,01; 0,05; ns – brak istotnego działania czynnika; SPAD – wskaźnik odczytu N-testera; N/S – indeks – wartość niemianowana.

Załącznik 4.8b. Macierz korelacji między składnikami pokarmowymi w stadium BBCH 65 a plonem ziarna i indeksami odżywienia doświadczenie nawadniane, n = 54

	S	P	K	Na	Mg	Ca	Fe	Mn	Zn	Cu	SPAD	N/S	PLZ
N	0,28**	-0,52***	-0,03	0,17	0,59***	0,36**	0,29*	-0,56***	-0,03	-0,07	0,62***	-0,17	0,32*
S	1,00	-0,81***	0,87***	0,89***	0,79***	0,88***	-0,10	-0,37**	0,02	-0,80***	0,84***	-0,91***	0,69***
P		1,00	-0,60***	-0,75***	-0,83***	-0,87***	0,06	0,67***	0,23	0,77***	-0,83***	0,75***	-0,52***
K			1,00	0,89***	0,67***	0,82***	-0,23	-0,05	0,15	-0,81***	0,69***	-0,77***	0,67***
Na				1,00	0,75***	0,83***	-0,13	-0,28*	0,04	-0,84***	0,79***	-0,80***	0,68***
Mg					1,00	0,88***	0,05	-0,50***	-0,04	-0,66***	0,91***	-0,68***	0,63***
Ca						1,00	-0,19	-0,47***	-0,07	-0,83***	0,89***	-0,80***	0,69***
Fe							1,00	-0,03	0,01	0,25	0,02	0,18	-0,03
Mn								1,00	0,61***	0,42**	-0,47***	0,42**	-0,07
Zn									1,00	0,32*	0,05	0,04	0,19
Cu										1,00	-0,68***	0,79***	-0,59***
SPAD											1,00	-0,73***	0,75***
N/S												1,00	-0,53***

Źródło: opracowanie własne; ***, **, * - istotność na poziomie 0,001; 0,01; 0,05; brak oznaczenia – brak istotnego działania czynnika; SPAD – wskaźnik odczytu N-testera; N/S – indeks – wartość niemianowana.

Załącznik 4.9a. Zawartość składników pokarmowych w łodydze kukurydzy w stadium BBCH, współdziałania
– doświadczenie nienawadniane

Czynnik	Poziom Czynnika	N	P	K	Na	Mg	Ca	Fe	Mn	Zn	Cu
	Lata × SYS	ns	ns	ns	ns	ns	2,6*	ns	ns	ns	ns
	Lata × ND	2,5*	2,5*	ns	ns	ns	ns	2,4*	7,2***	4,9***	3,8*
	SYS × ND	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
	Lata × SYS × ND	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	1,8*	ns	1,7*

Źródło: opracowanie własne; ***, **, * - istotność na poziomie 0,001; 0,01; 0,05; ns – brak istotnego działania czynnika.

Załącznik 4.9b. Macierz korelacji między składnikami pokarmowymi w stadium BBCH 61 a plonem ziarna
– doświadczenie nienawadniane, n = 54

Cechy	P	K	Na	Mg	Ca	Fe	Mn	Zn	Cu	PLZ
N	-0,23*	0,22	-0,56***	0,79***	0,74***	0,67***	0,37**	0,58***	0,74***	0,31*
P	1,00	0,63***	0,80***	-0,03	-0,41**	-0,18	0,46***	0,35*	0,09	0,2
K		1,00	0,52***	0,59***	0,09	0,39**	0,81***	0,85***	0,73***	0,51***
Na			1,00	-0,23	-0,68***	-0,36**	0,30*	0,13	-0,13	0,13
Mg				1,00	0,79***	0,76***	0,57***	0,79***	0,90***	0,48***
Ca					1,00	0,73***	0,20	0,43**	0,66***	0,23
Fe						1,00	0,43**	0,66***	0,80***	0,22
Mn							1,00	0,85***	0,71***	0,58***
Zn								1,0000	0,93***	0,55***
Cu									1,00	0,50***

Źródło: opracowanie własne; ***, **, * - istotność na poziomie 0,001; 0,01; 0,05; brak oznaczenia – brak istotnego działania czynnika.

Załącznik 4.10a. Zawartość składników pokarmowych w łodydze kukurydzy w stadium BBCH 61, współdziałania – doświadczenie nawadniane

Czynnik	Poziom Czynnika	N	P	K	Na	Mg	Ca	Fe	Mn	Zn	Cu
	Lata × SYS	5,0***	ns	ns	ns	3,0*	8,8***	2,7*	ns	3,7**	3,1**
	Lata × ND	2,7**	2,1*	2,1*	ns	3,2***	2,4**	ns	2,8**	ns	2,9*
	SYS × ND	2,1*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	2,0*	ns	ns
	Lata × SYS × ND	2,1**	ns	ns	ns	ns	ns	ns	1,6*	ns	ns

Źródło: opracowanie własne; ***, **, * - istotność na poziomie 0,001; 0,01; 0,05; ns – brak istotnego działania czynnika.

Załącznik 4.10b. Macierz korelacji między składnikami pokarmowymi w stadium BBCH 61 a plonem ziarna – doświadczenie nawadniane, n = 54

Cechy	P	K	Na	Mg	Ca	Fe	Mn	Zn	Cu	PLZ
N	-0,48***	-0,25	-0,38**	0,03	0,16	-0,31*	-0,16	-0,30*	-0,03	0,38**
P	1,00	0,57***	0,81***	0,01	-0,31*	0,73***	0,64***	0,80***	0,28*	-0,17
K		1,00	0,32*	0,77***	0,50***	0,82***	0,90***	0,84***	0,91***	0,47***
Na			1,00	-0,24	-0,49***	0,50***	0,36**	0,56***	-0,02	-0,34*
Mg				1,00	0,92***	0,50***	0,60***	0,44**	0,92***	0,67***
Ca					1,00	0,25	0,32*	0,13	0,76***	0,65***
Fe						1,00	0,82***	0,86***	0,70***	0,20
Mn							1,00	0,92***	0,79***	0,41**
Zn								1,00	0,67***	0,19
Cu									1,00	0,64***

Źródło: opracowanie własne; ***, **, * - istotność na poziomie 0,001; 0,01; 0,05; brak oznaczenia – brak istotnego działania czynnika.

Załącznik 4.11a. Zawartość składników pokarmowych w ziarnie kukurydzy, współdziałania – doświadczenie nienawadniane

Czynnik	Poziom Czynnika	N	P	K	Na	Mg	Ca	Fe	Mn	Zn	Cu
	Lata × SYS	ns	ns	ns	2,7*	ns	2,9*	ns	ns	ns	ns
	Lata × ND	2,0*	ns	ns	ns	2,2*	2,5**	ns	ns	ns	ns
	SYS × ND	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
	Lata × SYS × ND	ns	ns	ns	1,8*	1,7*	ns	ns	ns	ns	ns

Źródło: opracowanie własne; ***, **, * - istotność na poziomie 0,001; 0,01; 0,05; ns – brak istotnego działania czynnika.

Załącznik 4.11b. Macierz korelacji między składnikami pokarmowymi w ziarnie a plonem ziarna – doświadczenie nienawadniane, n = 54

Cecha	P	K	Na	Mg	Ca	Fe	Mn	Zn	Cu	PLZ
N	-0,09	0,31*	-0,14	0,25	0,06	-0,10	-0,04	0,31*	-0,15	0,16
P	1,00	-0,68***	-0,44**	0,65***	-0,78***	0,73***	-0,49***	-0,48***	-0,51***	-0,40**
K		1,00	0,21	-0,16	0,50***	-0,69***	0,27*	0,43**	0,29*	0,16
Na			1,00	-0,72***	0,43**	-0,15	0,60***	0,18	0,65***	0,21
Mg				1,00	-0,62***	0,30*	-0,68***	-0,20	-0,72***	-0,46***
Ca					1,00	-0,52***	0,57***	0,35**	0,53***	0,40***
Fe						1,00	-0,01	-0,35*	-0,01	-0,09
Mn							1,00	,39**	0,80***	0,55***
Zn								1,00	0,25	0,27*
Cu									1,00	0,49***

Źródło: opracowanie własne; ***, **, * - istotność na poziomie 0,001; 0,01; 0,05; brak oznaczenia – brak istotnego działania czynnika.

Załącznik 4.12a. Zawartość składników pokarmowych w ziarnie kukurydzy, współdziałania – doświadczenie nienawadniane

Czynnik	Poziom Czynnika	N	P	K	Na	Mg	Ca	Fe	Mn	Zn	Cu
	Lata × SYS	ns	ns	ns	6,2***	ns	3,7**	3,6**	ns	ns	ns
	Lata × ND	ns	ns	ns	2,8**	ns	3,1**	ns	ns	2,2*	ns
	SYS × ND	ns	ns	ns	2,2*	ns	4,0***	ns	ns	ns	ns
	Lata × SYS × ND	ns	ns	ns	1,8*	ns	4,1***	ns	ns	ns	ns

Źródło: opracowanie własne; ***, **, * - istotność na poziomie 0,001; 0,01; 0,05; ns – brak istotnego działania czynnika.

Załącznik 4.12b. Macierz korelacji między składnikami pokarmowymi w ziarnie a plonem ziarna – doświadczenie nawadniane, n = 54

Cecha	P	K	Na	Mg	Ca	Fe	Mn	Zn	Cu	PLZ
N	-0,61***	-0,54***	-0,40**	0,06	0,33*	-0,38**	-0,57***	-0,15	-0,63***	0,15
P	1,00	0,13	0,77***	0,51***	-0,07	0,89***	0,48***	0,62***	0,67***	-0,47***
K		1,00	-0,06	-0,25	-0,58***	-0,15	0,74***	-0,08	0,48***	0,39**
Na			1,00	0,47***	0,08	0,79***	0,26	0,60***	0,53***	-0,49***
Mg				1,00	0,31*	0,61***	-0,02	0,59***	0,22	-0,41**
Ca					1,00	0,10	-0,53***	0,03	-0,35*	-0,36**
Fe						1,00	0,29*	0,73***	0,60***	-0,55***
Mn							1,00	0,37**	0,70***	0,24
Zn								1,00	0,49***	-0,33*
Cu									1,00	-0,05

Źródło: opracowanie własne; ***, **, * - istotność na poziomie 0,001; 0,01; 0,05; brak oznaczenia – brak istotnego działania czynnika.

Załącznik 4.13a. Zawartość składników pokarmowych w słomie kukurydzy, współdziałania – doświadczenie nienawadniane

Czynnik	Poziom czynnik	N	P	K	Na	Mg	Ca	Fe	Mn	Zn	Cu
	Lata × SYS	ns	ns	ns	3,8**	ns	ns	ns	ns	ns	ns
	Lata × ND	ns	2,0 *	ns	ns	ns	ns	ns	5,0***	3,6***	3,4*
	SYS × ND	ns	ns	ns	1,8*	ns	ns	ns	2,6**	ns	ns
	Lata × SYS × ND	ns	ns	ns	ns	ns	2,6***	ns	2,0**	ns	ns

Źródło: opracowanie własne; ***, **, * - istotność na poziomie 0,001; 0,01; 0,05; ns – brak istotnego działania czynnika.

Załącznik 4.13b. Macierz korelacji między składnikami pokarmowymi w słomie kukurydzy a plonem ziarna – doświadczenie nienawadniane, n = 54

Cecha	P	K	Na	Mg	Ca	Fe	Mn	Zn	Cu	PLZ
N	0,67***	0,74***	0,69***	0,90***	0,91***	0,27*	0,32*	0,90***	0,88***	0,41*
P	1,00	0,88***	0,82***	0,83***	0,77***	0,73***	0,75***	0,83***	0,85***	0,56***
K		1,00	0,91***	0,92***	0,86***	0,82***	0,79***	0,91***	0,96***	0,55***
Na			1,00	0,87***	0,85***	0,75***	0,67***	0,83***	0,88***	0,42**
Mg				1,00	0,94***	0,59***	0,59***	0,95***	0,97***	0,49***
Ca					1,00	0,50***	0,51***	0,92***	0,94***	0,45**
Fe						1,00	0,85***	0,58***	0,66***	0,44**
Mn							1,00	0,63***	0,64***	0,57***
Zn								1,00	0,97***	0,49***
Cu									1,00	0,50***

Źródło: opracowanie własne; ***, **, * - istotność na poziomie 0,001; 0,01; 0,05; brak oznaczenia – brak istotnego działania czynnika; niemianowana.

Załącznik 4.14a. Zawartość składników pokarmowych w słomie kukurydzy, współdziałania – doświadczenie nawadniane

Czynnik czynnika	Poziom	N	P	K	Na	Mg	Ca	Fe	Mn	Zn	Cu
Lata × SYS		ns	ns	ns	ns	ns	30,8**	2,6*	ns	8,3***	ns
Lata × ND		ns	ns	ns	ns	2,0*	2,8**	ns	2,6**	1,9*	2,0*
SYS × ND		ns	2,3*	ns	ns	ns	ns	ns	2,3*	ns	ns
Lata × SYS × ND		2,1**	ns	2,6***	2,1**	ns	1,7*	ns	6,6***	2,8***	ns

Źródło: opracowanie własne; ***, **, * - istotność na poziomie 0,001; 0,01; 0,05; ns – brak istotnego działania czynnika; SPAD – wskaźnik odczytu N-testera; N/S – indeks – wartość niemianowana.

Załącznik 4.14b. Macierz korelacji między składnikami pokarmowymi w słomie kukurydzy a plonem ziarna i indeksami odżywienia – doświadczenie nawadniane, n = 54

Cecha	P	K	Na	Mg	Ca	Fe	Mn	Zn	Cu	PLZ
N	-0,20	0,28*	-0,18	0,25	0,26	-0,11	-0,06	0,23	-0,07	0,28*
P	1,00	-0,53***	0,48***	-0,53***	-0,40**	0,33*	0,23	-0,36**	0,50***	-0,48***
K		1,00	-0,35*	0,46**	0,32*	-0,24	-0,15	0,35**	-0,30*	0,38**
Na			1,00	0,30*	0,41**	0,90***	0,82***	0,44**	0,93***	0,07
Mg				1,00	0,96***	0,43**	0,51***	0,82***	0,31*	0,69***
Ca					1,00	0,51***	0,59***	0,78***	0,42***	0,64***
Fe						1,00	0,82***	0,54***	0,89***	0,13
Mn							1,00	0,67***	0,85***	0,37**
Zn								1,00	0,47***	0,62***
Cu									1,00	0,10

Źródło: opracowanie własne; ***, **, * - istotność na poziomie 0,001; 0,01; 0,05; brak oznaczenia – brak istotnego działania czynnika.

Załącznik 4.15a. Masa azotu mineralnego (N_{\min}) w glebie w stadium BBCH 14, kg N ha⁻¹, współdziałania – doświadczenie nienawadniane

Czynnik	Poziom czynnika	A-NH ₄	B-NH ₄	C-NH ₄	A-NO ₃	B-NO ₃	C-NO ₃	A-N _{min}	B-N _{min}	C-N _{min}	N _{min15}
Lata × SYS		ns	ns	ns	13,8***	ns	ns	12,3***	ns	ns	10,4***
Lata × ND		6,7***	2,8 *	3,1*	29,3***	ns	2,8*	35,3***	ns	3,7***	32,4***
SYS × ND		4,8**	ns	ns	ns	ns	4,7**	ns	ns	40,2**	ns
Lata × SYS × ND		6,7***	3,3**	ns	8,5***	3,5**	3,6**	8,1***	4,0***	2,9**	6,7***

Źródło: opracowanie własne; ***, **, * - istotność na poziomie 0,001; 0,01; 0,05; ns – brak istotnego działania czynnika.

Załącznik 4.15b. Macierz korelacji między N_{\min} a plonem ziarna i składowymi plonu, doświadczenie nienawadniane, n = 27

Cechy	B-NH ₄	C-NH ₄	A-NO ₃	B-NO ₃	C-NO ₃	A-N _{min}	B-N _{min}	C-N _{min}	N _{min14}	PLZ	R	LZR	LZK	LZ	MTZ
A-NH ₄	0,41*	0,09	0,24	0,19	-0,03	0,39*	0,28	0,02	0,39*	0,40*	0,03	0,40*	0,35	0,29	0,60**
B-NH ₄	1,00	0,56**	0,40*	0,55**	-0,01	0,44*	0,76***	0,32	0,56**	0,52**	0,15	0,74***	0,69***	0,37	0,65***
C-NH ₄		1,00	0,29	-0,07	-0,26	0,29	0,13	0,35	0,31	0,32	0,31	0,71***	0,71***	0,17	0,19
A-NO ₃			1,00	0,42*	0,05	0,99***	0,46*	0,22	0,96***	0,38	0,16	0,28	0,28	0,30	0,31
B-NO ₃				1,00	0,47*	0,43*	0,96***	0,41*	0,61**	0,50**	0,08	0,36	0,33	0,51**	0,53**
C-NO ₃					1,00	0,04	0,36	0,82***	0,20	0,29	0,08	-0,04	-0,02	0,41*	0,15
A-N _{min}						1,00	0,48*	0,22	0,97***	0,42*	0,16	0,33	0,32	0,33	0,39*
B-N _{min}							1,00	0,43*	0,66***	0,56**	0,11	0,52**	0,48*	0,52**	0,63**
C-N _{min}								1,00	0,38*	0,47*	0,26	0,39*	0,41*	0,50**	0,25
N _{min14}									1,00	0,53**	0,19	0,43*	0,43	0,43	0,49

Źródło: opracowanie własne; ***, **, * - istotność na poziomie 0,001; 0,01; 0,05; brak oznaczenia – brak istotnego działania czynnika; A, B, C – warstwy gleby, odpowiednio: 0-30, 30-60; 60-90 cm; NO₃ → N-NO₃ – azot azotanowy; NH₄ → N-NH₄ – azot amonowy.

Załącznik 4.16a. Zawartość azotu mineralnego (N_{min}) w glebie w stadium BBCH 14, współdziałania – doświadczenie nawadniane

Czynnik	Poziom czynnika	A-NH ₄	B-NH ₄	C-NH ₄	A-NO ₃	B-NO ₃	C-NO ₃	A-N _{min}	B-N _{min}	C-N _{min}	N _{min14}
Lata × SYS		6,1***	ns	3,7**	ns	ns	3,5*	ns	ns	4,6**	ns
Lata × ND		11,7***	ns	3,3*	4,8***	ns	ns	5,3***	3,6**	ns	7,8***
SYS × ND		ns	ns	4,4**	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Lata × SYS × ND		6,2***	ns	5,1***	ns	ns	ns	20,1*	ns	3,4**	2,9**

Źródło: opracowanie własne; ***, **, * - istotność na poziomie 0,001; 0,01; 0,05; ns – brak istotnego działania czynnika.

Załącznik 4.16b. Macierz korelacji między N_{min} a plonem ziarna i składowymi plonu0, doświadczenie nienawadniane, n = 27

Cechy	B-NH ₄	C-NH ₄	A-NO ₃	B-NO ₃	C-NO ₃	A-N _{min}	B-N _{min}	C-N _{min}	N _{min14}	PLZ	R	LZR	LZK	LZ	MTZ
A-NH ₄	0,60**	0,41*	0,23	0,58**	0,09	0,48*	0,74***	0,37	0,54**	0,26	0,17	0,33	0,34	0,17	0,31
B-NH ₄	1,00	0,81***	0,33	0,22	-0,04	0,46*	0,90***	0,60**	0,60**	-0,16	0,09	0,55**	0,43*	-0,25	-0,02
C-NH ₄		1,00	0,36	0,12	0,09	0,43*	0,71***	0,82***	0,59**	-0,34	0,03	0,57**	0,41*	-0,41*	-0,15
A-NO ₃			1,00	0,52**	0,61***	0,97***	0,49**	0,63***	0,92***	0,17	0,62**	0,40*	0,61**	0,16	0,22
B-NO ₃				1,00	0,66***	0,62**	0,62**	0,47	0,65***	0,51**	0,49**	0,23	0,44*	0,50**	0,41
C-NO ₃					1,00	0,58**	0,26	0,64***	0,59**	0,49*	0,63***	0,33	0,58**	0,52**	0,39*
A-N _{min}						1,00	0,64***	0,67***	0,98***	0,22	0,60**	0,45*	0,64***	0,19	0,28
B-N _{min}							1,00	0,69***	0,77***	0,09	0,29	0,54**	0,54**	0,02	0,16
C-N _{min}								1,00	0,79***	0,02	0,39*	0,63***	0,65***	-0,02	0,11
N _{min14}									1,00	0,18	0,57**	0,54**	0,69***	0,14	0,25

Źródło: opracowanie własne; ***, **, * - istotność na poziomie 0,001; 0,01; 0,05; brak oznaczenia – brak istotnego działania czynnika; A, B, C – warstwy gleby, odpowiednio: 0-30, 30-60; 60-90 cm; NO₃ → N-NO₃ – azot azotanowy; NH₄ → N-NH₄ – azot amonowy.

Załącznik 4.17a. Zawartość azotu mineralnego (N_{\min}) w glebie w stadium BBCH 61, współdziałania – doświadczenie nienawadniane

Czynnik	Poziom czynnika	A-NH ₄	B-NH ₄	C-NH ₄	A-NO ₃	B-NO ₃	C-NO ₃	A-N _{min}	B-N _{min}	C-N _{min}	N _{min61}
	Lata × SYS	4,7**	ns	ns	9,2***	7,5 ***	6,1***	9,7***	ns	ns	ns
	Lata × ND	10,9***	9,3***	9,5***	17,4***	ns	8,5***	10,5***	6,3***	25,8***	8,4***
	SYS × ND	13,0***	ns	ns	7,8***	7,8***	2,8*	ns	ns	ns	ns
	Lata × SYS × ND	12,5***	ns	ns	2,5*	7,2***	ns	7,7***	ns	ns	ns

Źródło: opracowanie własne;***, **, * - istotność na poziomie 0,001; 0,01; 0,05; ns – brak istotnego działania czynnika.

Załącznik 4.17b. Macierz korelacji między N_{\min} a plonem ziarna i składowymi plonu, doświadczenie nienawadniane, n = 27

Cechy	B-NH ₄	C-NH ₄	A-NO ₃	B-NO ₃	C-NO ₃	A-N _{min}	B-N _{min}	C-N _{min}	N _{min61}	PLZ	R	LZR	LZK	LZ	MTZ
A-NH ₄	0,63***	0,77***	0,37	0,44*	0,50**	0,87***	0,65***	0,76***	0,80***	0,55**	0,04	0,50**	0,45*	0,42*	0,73***
B-NH ₄	1,00	0,95***	0,32	0,46*	0,49**	0,59**	0,92***	0,89***	0,88***	0,67***	0,28	0,64***	0,64***	0,50**	0,54**
C-NH ₄		1,00	0,32	0,59**	0,54**	0,69***	0,93***	0,95***	0,94***	0,77***	0,31	0,76***	0,75***	0,55**	0,71***
A-NO ₃			1,00	0,53**	0,70***	0,78***	0,46*	0,50**	0,59**	0,27	0,08	0,20	0,19	0,35	0,46*
B-NO ₃				1,00	0,71***	0,58**	0,78***	0,70***	0,74***	0,48*	0,21	0,61**	0,58**	0,41*	0,54**
C-NO ₃					1,00	0,70***	0,67***	0,77***	0,77***	0,40*	0,07	0,38	0,35	0,33	0,59**
A-N _{min}						1,00	0,68***	0,78***	0,85***	0,52**	0,07	0,45*	0,40*	0,47*	0,73***
B-N _{min}							1,00	0,95***	0,95***	0,69***	0,29	0,73***	0,72***	0,53**	0,63***
C-N _{min}								1,00	0,99***	0,73***	0,23	0,71***	0,69***	0,54**	0,76***
N _{min65}									1,00	0,70***	0,23	0,69***	0,67***	0,55**	0,75***

Źródło: opracowanie własne;***, **, * - istotność na poziomie 0,001; 0,01; 0,05; brak oznaczenia – brak istotnego działania czynnika; A, B, C – warstwy gleby, odpowiednio: 0-30, 30-60; 60-90 cm; NO₃ → N-NO₃ – azot azotanowy; NH₄ → N-NH₄ – azot amonowy.

Załącznik 4.18a. Zawartość azotu mineralnego (N_{\min}) w glebie w stadium BBCH 61, współdziałania – doświadczenie nawadniane

Czynnik	Poziom czynnika	A-NH ₄	B-NH ₄	C-NH ₄	A-NO ₃	B-NO ₃	C-NO ₃	A-N _{min}	B-N _{min}	C-N _{min}	N _{min61}
Lata × SYS		ns	ns	ns	5,4***	7,9***	5,2***	ns	7,6***	ns	3,6**
Lata × ND		ns	15,8***	13,2***	9,0***	10,2***	27,1***	5,3***	16,3***	25,8***	19,7***
SYS × ND		6,3***	5,4***	3,9**	ns	3,4*	6,0***	2,5*	5,4***	5,9***	6,8***
Lata × SYS × ND		8,8***	4,7***	7,1***	3,7**	5,5***	8,3***	7,4***	5,8***	9,2***	9,7***

Źródło: opracowanie własne; ***, **, * - istotność na poziomie 0,001; 0,01; 0,05; ns – brak istotnego działania czynnika.

Załącznik 4.18b. Macierz korelacji między N_{\min} a plonem ziarna i składowymi plonu, doświadczenie nawadniane, n = 27

Cechy	B-NH ₄	C-NH ₄	A-NO ₃	B-NO ₃	C-NO ₃	A-N _{min}	B-N _{min}	C-N _{min}	N _{min61}	PLZ	R	LZR	LZK	LZ	MTZ
A-NH ₄	0,70***	0,79***	0,49*	0,48*	0,42*	0,86***	0,63***	0,71***	0,74***	0,36	0,17	0,58**	0,49*	0,17	0,47*
B-NH ₄	1,00	0,96***	0,41*	0,76***	0,66***	0,64***	0,95***	0,93***	0,93***	-0,09	0,15	0,63***	0,53***	-0,21	0,07
C-NH ₄		1,00	0,46*	0,70***	0,61**	0,72***	0,90***	0,93***	0,93***	0,06	0,12	0,63***	0,50**	-0,08	0,21
A-NO ₃			1,00	0,60**	0,58**	0,87***	0,53**	0,57**	0,63***	0,41*	0,05	0,36	0,27	0,23	0,49*
B-NO ₃				1,00	0,88***	0,62**	0,93***	0,86***	0,89***	0,04	0,28	0,53**	0,51**	-0,09	0,22
C-NO ₃					1,00	0,58**	0,81***	0,86***	0,84***	-0,04	0,18	0,36	0,35	-0,13	0,15
A-N _{min}						1,00	0,67***	0,74***	0,79***	0,45*	0,13	0,54**	0,44*	0,23	0,57**
B-N _{min}							1,00	0,96***	0,97***	-0,04	0,22	0,62**	0,56**	-0,17	0,15
C-N _{min}								1,00	0,99***	0,04	0,16	0,57**	0,49*	-0,11	0,21
N _{min61}									1,00	0,07	0,19	0,62**	0,53**	-0,08	0,25

Źródło: opracowanie własne; ***, **, * - istotność na poziomie 0,001; 0,01; 0,05; brak oznaczenia – brak istotnego działania czynnika; A, B, C – warstwy gleby, odpowiednio: 0-30, 30-60; 60-90 cm; NO₃ → N-NO₃ – azot azotanowy; NH₄ → N-NH₄ – azot amonowy.

Załącznik 4.19a. Zawartość azotu mineralnego (N_{\min}) w glebie w stadium BBCH 89, współdziałania – doświadczenie nienawadniane

Czynnik	Poziom Czynnika	A-NH ₄	B-NH ₄	C-NH ₄	A-NO ₃	B-NO ₃	C-NO ₃	A-N _{min}	B-N _{min}	C-N _{min}	N _{min} 89
	Lata × SYS	10,4***	3,1*	ns	4,5**	5,4***	3,7**	9,0***	4,1**	3,8**	6,7***
	Lata × ND	ns	7,8***	3,8**	3,4*	14,4***	3,8**	2,7*	13,3***	4,6**	5,8***
	SYS × ND	5,6***	3,1*	3,3*	ns	11,6***	3,7**	3,4*	7,7***	5,1***	6,9***
	Lata × SYS × ND	2,9**	4,9***	4,3***	2,4*	9,0***	6,0***	2,2*	8,1***	7,4***	8,1***

Źródło: opracowanie własne; ***, **, * - istotność na poziomie 0,001; 0,01; 0,05; ns – brak istotnego działania czynnika.

Załącznik 4.19b. Macierz korelacji między N_{\min} a plonem ziarna i składowymi plonu, doświadczenie nienawadniane, n = 27

Cechy	B-NH ₄	C-NH ₄	A-NO ₃	B-NO ₃	C-NO ₃	A-N _{min}	B-N _{min}	C-N _{min}	N _{min} 89	PLZ	R	LZR	LZK	LZ	MTZ
A-NH ₄	0,73***	0,84***	0,82***	0,59**	0,61**	0,96***	0,69***	0,79***	0,83***	0,45*	0,17	0,62**	0,58**	0,28	0,53***
B-NH ₄	1,00	0,95***	0,7***	0,84***	0,8***	0,76***	0,96***	0,94***	0,96***	0,65***	0,27	0,75***	0,72***	0,47*	0,66***
C-NH ₄		1,00	0,77***	0,82***	0,78***	0,85***	0,92***	0,96***	0,97***	0,54**	0,18	0,76***	0,71***	0,40*	0,64***
A-NO ₃			1,00	0,45*	0,54*	0,94***	0,60**	0,71***	0,76***	0,53**	0,22	0,67***	0,63***	0,39*	0,76***
B-NO ₃				1,00	0,92***	0,56**	0,96***	0,91***	0,90***	0,52**	0,38	0,74***	0,74***	0,41*	0,32
C-NO ₃					1,00	0,61**	0,90***	0,92***	0,89***	0,41*	0,30	0,65***	0,64***	0,20	0,38
A-N _{min}						1,00	0,68***	0,79***	0,84***	0,51**	0,21	0,67***	0,63***	0,34	0,66***
B-N _{min}							1,00	0,96***	0,96***	0,61**	0,34	0,77***	0,76***	0,46*	0,50**
C-N _{min}								1,00	0,99***	0,52**	0,24	0,75***	0,72***	0,34	0,56**
N _{min} 89									1,00	0,58**	0,28	0,78***	0,75***	0,40*	0,59**

Źródło: opracowanie własne; ***, **, * - istotność na poziomie 0,001; 0,01; 0,05; brak oznaczenia – brak istotnego działania czynnika; A, B, C – warstwy gleby, odpowiednio: 0-30, 30-60; 60-90 cm; NO₃ → N-NO₃ – azot azotanowy; NH₄ → N-NH₄ – azot amonowy.

Załącznik 4.20a. Zawartość azotu mineralnego (N_{min}) w glebie w stadium BBCH 89, współdziałania – doświadczenie nawadniane

Czynnik	Poziom czynnika	A-NH ₄	B-NH ₄	C-NH ₄	A-NO ₃	B-NO ₃	C-NO ₃	A-N _{min}	B-N _{min}	C-N _{min}	N _{min} 89
Lata × SYS		4,3**	7,78***	4,6**	ns	3,5*	ns	3,7*	4,6**	3,2*	2,9*
Lata × ND		ns	15,4***	3,4*	3,1*	ns	ns	ns	6,9***	2,6*	4,8**
SYS × ND		ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Lata × SYS × ND		ns	ns	ns	2,9**	ns	3,1*	ns	ns	ns	ns

Źródło: opracowanie własne; ***, **, * - istotność na poziomie 0,001; 0,01; 0,05; ns – brak istotnego działania czynnika.

Załącznik 4.20b. Macierz korelacji między N_{min} a plonem ziarna i składowymi plonu, doświadczenie nawadniane, n = 27

Cechy	B-NH ₄	C-NH ₄	A-NO ₃	B-NO ₃	C-NO ₃	A-N _{min}	B-N _{min}	C-N _{min}	N _{min} 89	PLZ	R	LZR	LZK	LZ	MTZ
A-NH ₄	0,81***	0,94***	0,80***	0,71***	0,78***	0,94***	0,80***	0,83***	0,93***	-0,07	-0,12	0,40*	0,21	-0,18	0,03
B-NH ₄	1,00	0,88***	0,69***	0,82***	0,72***	0,79***	0,96***	0,69***	0,90***	0,21	-0,03	0,49*	0,33	0,13	0,20
C-NH ₄		1,00	0,80***	0,78***	0,79***	0,91***	0,87***	0,87***	0,96***	0,01	-0,18	0,49*	0,24	-0,07	0,04
A-NO ₃			1,00	0,82***	0,93***	0,96***	0,79***	0,67***	0,89***	0,01	-0,01	0,52**	0,36	-0,15	0,15
B-NO ₃				1,00	0,85***	0,81***	0,95***	0,61**	0,88***	0,05	-0,02	0,52**	0,36	-0,03	0,10
C-NO ₃					1,00	0,91***	0,82***	0,72***	0,89***	0,01	0,05	0,58**	0,43*	-0,11	0,09
A-N _{min}						1,00	0,84***	0,78***	0,96***	-0,03	-0,06	0,49***	0,31	-0,17	0,10
B-N _{min}							1,00	0,68***	0,93***	0,14	-0,03	0,52***	0,36	0,06	0,16
C-N _{min}								1,00	0,86***	-0,18	-0,01	0,55**	0,37	-0,14	-0,18
N _{min} 89									1,00	-0,01	-0,04	0,56**	0,38	-0,08	0,06

Źródło: opracowanie własne; ***, **, * - istotność na poziomie 0,001; 0,01; 0,05; brak oznaczenia – brak istotnego działania czynnika; A, B, C – warstwy gleby, odpowiednio: 0-30, 30-60; 60-90 cm; NO₃ → N-NO₃ – azot azotanowy; NH₄ → N-NH₄ – azot amonowy.

Załącznik 4.21a. Akumulacja azotu w okresie wegetacji kukurydzy, wskaźniki akumulacji, współdziałania – doświadczenie nienawadniane

Czynnik	Poziom Czynnika	NA ₁₄	NA ₆₁	Nz	Ns	NAc	AJN	PJN	IN
	Lata × SYS	6,2***	ns	2,8*	ns	ns	ns	3,3*	ns
	Lata × ND	2,4*	ns	6,5***	4,1***	3,3***	2,1*	2,9**	ns
	SYS × ND	ns	ns	2,3*	2,4*	2,3*	2,6**	ns	2,2*
	Lata × SYS × ND	ns	ns	2,6***	1,91*	2,2**	2,4**	ns	ns

Źródło: opracowanie własne; ***, **, * – istotność na poziomie 0,001; 0,01; 0,05; ns – brak istotnego działania czynnika; NA – zakumulowany azot; 14, 61 – fazy rozwoju kukurydzy w skali BBCH; z, s, c – ziarno, słoma, akumulacja całkowita; AJN – akumulacja jednostkowa azotu; PJN – produktywność jednostkowa azotu; IN – indeks żniwny azotu.

Załącznik 4.21b. Macierz korelacji składowych i wskaźników akumulacji azotu, doświadczenie nienawadniane, n = 54

Cechy	NA ₆₁	Nz	Ns	NAc	AJN	PJN	IN	PLZ	OB	R	LZR	LZK	MTZ	LZ
NA ₁₄	-0,36**	0,24	0,10	0,13	0,02	-0,01	0,10	0,46***	-0,46***	0,44**	0,80***	0,80***	0,50***	0,20
NA ₆₁	1,00	0,48***	0,64***	0,63***	0,65***	-0,67***	-0,59***	0,14	0,70***	-0,33*	-0,17	-0,24	0,29*	0,31*
Nz		1,00	0,75***	0,82***	0,68***	-0,73***	-0,64***	0,81***	0,47***	0,24	0,48***	0,48***	0,70***	0,71***
Ns			1,00	0,99***	0,97***	-0,95***	-0,97***	0,44**	0,70***	-0,05	0,36**	0,29*	0,75***	0,54***
NAc				1,00	0,96***	-0,94***	-0,95***	0,53***	0,69***	0,01	0,40**	0,34*	0,77***	0,59***
AJN					1,00	-0,98***	-0,97***	0,28*	0,76***	-0,13	0,23	0,16	0,68***	0,44**
PJN						1,00	0,94***	-0,30*	-0,76***	0,07	-0,12	-0,14	-0,68***	-0,46**
IN							1,00	-0,32*	-0,63***	0,09	-0,34*	-0,26	-0,72***	-0,46**

Źródło: opracowanie własne; ***, **, * – istotność na poziomie 0,001; 0,01; 0,05; brak oznaczenia – brak istotnego działania czynnika; NA – zakumulowany azot; 14, 61 – fazy rozwoju kukurydzy w skali BBCH; z, s, c – ziarno, słoma, akumulacja całkowita; AJN – akumulacja jednostkowa azotu; PJN – produktywność jednostkowa azotu; IN – indeks żniwny azotu; PLZ – plon ziarna; OB – obsada roślin; R – liczba rzędów w kolbie; LZR – liczba ziarniaków w rzędzie; LZK – liczba ziarniaków w kolbie; MTZ – masa 1000 ziarniaków; LZ – liczba ziarniaków na m².

Załącznik 4.22a. Akumulacja azotu w okresie wegetacji kukurydzy, wskaźniki akumulacji, współdziałania – doświadczenie nawadniane

Czynnik	Poziom Czynnika	NA ₁₄	NA ₆₁	Nz	Ns	NAc	AJN	PJN	IN
	Lata × SYS	3,2*	ns	3,4*	3,3*	4,1**	3,4*	ns	ns
	Lata × ND	3,6***	7,5***	ns	ns	ns	2,6**	2,3***	2,1*
	SYS × ND	ns	ns	3,0**	ns	ns	2,4*	2,0*	2,0*
	Lata × SYS × ND	2,1**	ns	1,7*	2,9***	2,5***	3,6***	3,0***	2,2**

Źródło: opracowanie własne; ***, **, * – istotność na poziomie 0,001; 0,01; 0,05; ns – brak istotnego działania czynnika; NA – zakumulowany azot; 14, 61 – fazy rozwoju kukurydzy w skali BBCH; z, s, c – ziarno, słoma, akumulacja całkowita; AJN – akumulacja jednostkowa azotu; PJN – produktywność jednostkowa azotu; IN – indeks żniwny azotu.

Załącznik 4.22b. Macierz korelacji składowych i wskaźników akumulacji azotu, doświadczenie nawadniane, n = 54

Cechy	NA ₆₁	Nz	Ns	NAc	AJN	PJN	IN	PLZ	OB.	R	LZR	LZK	LZ	MTZ
NA ₁₄	0,27*	0,25	0,56***	0,47***	0,02	-0,01	0,44**	0,56***	0,22	-0,08	0,30*	0,18	0,39**	0,56***
NA ₆₁	1,00	0,81***	0,56***	0,76***	0,44**	-0,47***	-0,14	0,66***	0,81***	-0,07	-0,41**	-0,34*	0,49***	0,62***
Nz		1,00	0,60***	0,88***	0,36**	-0,42**	-0,26	0,87***	0,64***	0,22	-0,03	0,08	0,74***	0,79***
Ns			1,00	0,91***	0,70***	-0,68***	0,60***	0,65***	0,44**	-0,14	0,06	-0,02	0,41**	0,67***
NAc				1,00	0,60***	-0,62***	0,23	0,84***	0,59***	0,03	0,02	0,03	0,63***	0,81***
AJN					1,00	-0,98***	0,49***	0,08	0,31*	-0,23	-0,37**	-0,38**	-0,08	0,15
PJN						1,00	-0,43**	-0,13	-0,35**	0,21	0,35*	0,36**	0,02	-0,12
IN							1,00	-0,07	-0,10	-0,43**	0,13	-0,10	-0,24	0,05

Źródło: opracowanie własne; ***, **, * – istotność na poziomie 0,001; 0,01; 0,05; brak oznaczenia – brak istotnego działania czynnika; NA – zakumulowany azot; 14, 61 – fazy rozwoju kukurydzy w skali BBCH; z, s, c – ziarno, słoma, akumulacja całkowita; AJN – akumulacja jednostkowa azotu; PJN – produktywność jednostkowa azotu; IN – indeks żniwny azotu; PLZ – plon ziarna; OB – obsada roślin; R – liczba rzędów w kolbie; LZR – liczba ziarniaków w rzędzie; LZK – liczba ziarniaków w kolbie; MTZ – masa 1000 ziarniaków; LZ – liczba ziarniaków na m².

Załącznik 4.23a. Wskaźniki gospodarki azotem w kukurydzy w okresie przed i po kwitnieniu, współdziałania – doświadczenie nienawadniane

Czynnik	Poziom Czynnika	N _{in14}	N _{b61}	N _{g61}	N _{in61}	EN _{in14}	EN _{in61}	N _{b89}	N _{g89}	N _{in89}	ETN _{in61}	EN _{in89}	EN _{gr61}	EN _{gr89}
Lata × SYS		10,3***	ns	2,9*	2,9*	ns	4,8**	2,6*	2,7*	ns	6,1***	12,2***	4,8**	ns
Lata × ND		32,1***	12,7***	3,8**	6,3***	4,2**	6,5***	3,4*	3,4*	8,6***	7,2***	ns	8,4***	4,4**
SYS × ND		ns	ns	ns	ns	ns	ns	4,2**	4,6**	4,6**	2,8*	3,9**	3,6**	4,4**
Lata × SYS × ND		6,6***	2,1*	3,2**	ns	2,2*	2,5*	ns	ns	ns	2,7*	8,4***	ns	ns

Źródło: opracowanie własne; ***, **, * - istotność na poziomie 0,001; 0,01; 0,05; ns – brak istotnego działania czynnika.

Załącznik 4.23b. Macierz korelacji wskaźników gospodarki kukurydzy azotem w okresie przed kwitnieniem, n = 27

Cechy	N _{b61}	N _{g61}	N _{in61}	EN _{in14}	EN _{in61}	PLZ	R	LZR	LZK	LZ	MTZ
N _{in14}	0,84***	-0,32	0,71***	-0,79***	-0,54**	0,55**	0,21	0,48*	0,46*	0,46*	0,52**
N _{b61}	1,00	-0,63***	0,33	-0,93***	-0,64***	0,51**	0,38	0,68***	0,68***	0,41*	0,41*
N _{g61}		1,00	0,44*	0,50**	-0,09	0,08	-0,22	-0,14	-0,17	0,04	0,23
N _{in61}			1,00	-0,38	-0,58**	0,58**	0,03	0,34	0,31	0,47*	0,66***
EN _{in14}				1,00	0,71***	-0,54**	-0,46*	-0,70***	-0,72***	-0,46*	-0,51**
EN _{in61}					1,00	-0,64***	-0,36	-0,83***	-0,82***	-0,48*	-0,71***

Źródło: opracowanie własne; ***, **, * - istotność na poziomie 0,001; 0,01; 0,05; N – zakumulowany azot; 14, 61 – fazy rozwoju kukurydzy w skali BBCH; N_{in14}, N_{in61} – masa azotu w układzie gleba-roślina w stadium BBCH 14, 61; N_{b61} – bilans azotu w układzie gleba-roślina w okresie BBCH 14 - BBCH 61; N_{g61} – azot uruchomiony z zasobów glebowych w okresie BBCH 15 – 61; EN_{in14}, EN_{in61} – efektywność akumulacji w biomacie dla N_{in14} i N_{in61}; PLZ – plon ziarna; R – liczba rzędów w kolbie; LZR – liczba ziarniaków w rzędzie; LZK – liczba ziarniaków w kolbie; LZ – liczba ziarniaków na m²; MTZ – masa 1000 ziarniaków.

Załącznik 4.23c. Macierz korelacji wskaźników gospodarki kukurydzy azotem w okresie po kwitnieniu, n = 27

Cechy	N _{g89}	N _{in89}	ETN _{in61}	ETN _{in89}	EN _{gr61}	EN _{gr89}	PLZ	R	LZR	LZK	LZ	MTZ
N _{b89}	-0,90***	-0,76***	-0,95***	-0,28	-0,19	0,64***	-0,37	-0,09	-0,13	-0,13	-0,35	-0,56**
N _{g89}	1,00	0,91***	0,85***	-0,12	0,10	-0,86***	0,56**	0,20	0,45*	0,44*	0,49**	0,73***
N _{in89}		1,00	0,63***	-0,08	-0,24	-0,88***	0,65***	0,14	0,47*	0,44*	0,55**	0,81***
ETN _{in61}			1,00	0,25	0,43*	-0,53*	0,36	0,14	0,13	0,14	0,36	0,47*
ETN _{in89}				1,00	0,04	0,40*	-0,21	-0,25	-0,69***	-0,66***	-0,05	-0,24
EN _{gr61}					1,00	0,30	0,10	0,32	-0,02	0,07	0,09	-0,18
EN _{gr89}						1,00	-0,46*	-0,10	-0,58***	-0,53	-0,36	-0,78***

Źródło: opracowanie własne; ***, **, * - istotność na poziomie 0,001; 0,01; 0,05; N –zakumulowany azot; 61, 89 – fazy rozwoju kukurydzy w skali BBCH; N_{in89} – masa azotu w układzie gleba-roślina w stadium BBCH 89; N_{b89} – bilans azotu w układzie gleba-roślina w okresie BBCH 61 – BBCH 89; N_{g89} – azot uruchomiony z zasobów glebowych w okresie BBCH 61-89; ETN_{in61}, ETN_{in89} – efektywność całkowita akumulacji N w biomasie dla N_{in61} i N_{in89}; EN_{gr61}, EN_{gr89} – efektywność akumulacji N w ziarnie dla N_{in61} i N_{in89}; EN_{gr61}; PLZ – plon ziarna; R – liczba rzędów w kolbie; LZR – liczba ziarniaków w rzędzie; LZK – liczba ziarniaków w kolbie; LZ – liczba ziarniaków na m²; MTZ – masa 1000 ziarniaków.

Załącznik 4.24a. Wskaźniki gospodarki azotem w kukurydzy w okresie przed i po kwitnieniu, współdziałania – doświadczenie nawadniane

Czynnik	Poziom Czynnika	N _{in14}	N _{b61}	N _{g61}	N _{in61}	EN _{in14}	EN _{in61}	N _{b89}	N _{g89}	N _{in89}	ETN _{in61}	ETN _{in89}	EN _{gr61}	EN _{gr89}
	Lata × SYS	ns	ns	ns	ns	ns	3,1*	4,4**	4,2**	3,9**	4,7**	2,8*	3,5*	ns
	Lata × ND	8,5***	16,7***	10,6***	10,3***	ns	11,7***	7,5***	8,9***	ns	6,1***	4,5**	8,9***	ns
	SYS × ND	ns	ns	ns	2,9*	8,7***	3,3*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
	Lata × SYS × ND	3,4**	2,7*	3,4**	3,5**	ns	6,2***	3,0**	3,0**	3,6**	3,4**	ns	4,8***	ns

Źródło: opracowanie własne; ***, **, * - istotność na poziomie 0,001; 0,01; 0,05; ns – brak istotnego działania czynnika.

Załącznik 4.24b. Macierz korelacji wskaźników gospodarki kukurydzy azotem w okresie przed kwitnieniem, n = 27

Cechy	N _{b61}	N _{g61}	N _{in61}	EN _{in14}	EN _{in61}	PLZ	OB.	R	LZR	LZK	LZ	MTZ
N _{in14}	0,67***	-0,45*	0,26	-0,66***	-0,64***	0,21	-0,48*	0,56**	0,53**	0,68***	0,17	0,28
N _{b61}	1,00	-0,91***	-0,49*	-0,94***	-0,85***	-0,41*	-0,85***	0,20	0,53**	0,48*	-0,38*	-0,30
N _{g61}		1,00	0,74***	0,86***	0,59**	0,57**	0,75***	-0,15	-0,34	-0,32	0,44*	0,52**
N _{in61}			1,00	0,43*	0,17	0,78***	0,45*	0,26	0,04	0,17	0,60**	0,77***
EN _{in14}				1,00	0,82***	0,28	0,80***	-0,24	-0,56**	-0,52**	0,28	0,16
EN _{in61}					1,00	0,20	0,80***	-0,07	-0,65***	-0,49*	0,31	-0,01

Źródło: opracowanie własne; ***, **, * - istotność na poziomie 0,001; 0,01; 0,05; N – zakumulowany azot; 14, 61 – fazy rozwoju kukurydzy w skali BBCH; N_{in14}, N_{in61} – masa azotu w układzie gleba – roślina w stadium BBCH 14, 61; N_{b61} – bilans azotu w układzie gleba-roślina w okresie BBCH 14 - BBCH 61; N_{g61} – azot uruchomiony z zasobów glebowych w okresie BBCH 15 – 61; EN_{in14}, EN_{in61} – efektywność akumulacji w biomacie dla N_{in14} i N_{in61}; PLZ – plon ziarna; R – liczba rzędów w kolbie; LZR – liczba ziarniaków w rzędzie; LZK – liczba ziarniaków w kolbie; LZ – liczba ziarniaków na m²; MTZ – masa 1000 ziarniaków.

Załącznik 4.24c. Macierz korelacji wskaźników gospodarki kukurydzy azotem w okresie po kwitnieniu, n = 27

Cechy	N _{g89}	N _{in89}	ETN _{in61}	ETN _{in89}	EN _{gr61}	EN _{gr89}	PLZ	OB.	R	LZR	LZK	LZ	MTZ
N _{b89}	-0,90***	-0,06	-0,95***	0,01	-0,75***	0,11	0,07	-0,01	0,02	-0,16	-0,10	-0,10	0,21
N _{g89}	1,00	0,19	0,86***	-0,41*	0,49*	-0,48*	-0,07	-0,18	-0,03	0,39*	0,25	0,05	-0,16
N _{in89}		1,00	0,07	0,05	-0,13	-0,18	0,86***	0,38*	0,28	0,37	0,41*	0,75***	0,78***
ETN _{in61}			1,00	-0,02	0,78***	-0,12	-0,03	0,08	-0,08	0,17	0,06	0,14	-0,16
ETN _{in89}				1,00	0,34	0,85***	0,31	0,57**	0,17	-0,41*	-0,19	0,37	0,18
EN _{gr61}					1,00	0,47*	0,07	0,11	0,17	0,09	0,15	0,27	-0,07
EN _{gr89}						1,00	0,24	0,32	0,31	-0,25	-0,01	0,33	0,15

Źródło: opracowanie własne; ***, **, * - istotność na poziomie 0,001; 0,01; 0,05; N – zakumulowany azot; 61, 89 – fazy rozwoju kukurydzy w skali BBCH; N_{in89} – masa azotu w układzie gleba-roślina w stadium BBCH 89; N_{b89} – bilans azotu w układzie gleba-roślina w okresie BBCH 61 – BBCH 89; N_{g89} – azot uruchomiony z zasobów glebowych w okresie BBCH 61-89; ETN_{in61}, ETN_{in89} – efektywność całkowita akumulacji N w biomacie dla N_{in61} i N_{in89}; EN_{gr61}, EN_{gr89} – efektywność akumulacji N w ziarnie dla N_{in61} i N_{in89}; EN_{gr61}; PLZ – plon ziarna; R – liczba rzędów w kolbie; LZR – liczba ziarniaków w rzędzie; LZK – liczba ziarniaków w kolbie; LZ – liczba ziarniaków na m²; MTZ – masa 1000 ziarniaków.

Załącznik 5.1. Ocena zawartości składników pokarmowych w ziarnie na tle zakresów optymalnych^{1,2,3}

Czynnik	Poziom Czynnika	N	P	K	Na ²	Mg	Ca	Fe	Mn	Zn ²	Cu
		g kg ⁻¹ s.m.			mg kg ⁻¹ s.m.						
Zakresy optymalne											
		20-25	2-6	2-4	100	900-2000	100-200	10-50	1-15	20-27	1-5
Doświadczenie nienawadniane											
Lata (L)	2020	17,2 ^a	2,5 ^a	3,2 ^b	52,8 ^b	842 ^a	25,8 ^c	19,3 ^b	4,1 ^b	14,8 ^b	1,3 ^a
	2021	16,0 ^b	2,4 ^b	2,9 ^b	87,9 ^a	533 ^b	50,2 ^b	21,3 ^a	5,5 ^a	14,1 ^b	2,1 ^b
	2022	17,2 ^a	1,6 ^c	4,4 ^a	85,0 ^a	476 ^c	87,6 ^a	14,8 ^c	5,6 ^a	16,9 ^a	2,1 ^b
Doświadczenie nawadniane											
Lata (L)	2020	16,6a	2,3b	2,8b	96,6b	686a	25b	16,0b	3,3c	12,3b	1,3c
	2021	12,9c	3,7a	4,8a	128,6a	674a	159a	21,6a	5,6a	14,0a	2,1a
	2022	15,1b	1,7c	5,0a	61,3c	557b	148a	8,7c	4,7b	9,8c	1,5b

¹Benton Jones (2003); ²NRC (1996); ³Simic i in. 2009; ^a – ta sama litera w rzędzie oznacza brak istotnego zróżnicowania cechy w kolumnie dla danego czynnika. Źródło: opracowanie własne.

Załącznik 5.2. Ocena wpływu lat i systemów nawożenia siarką na stan odżywienia kukurydzy w stadium BBCH 14 na podstawie zawartości składników pokarmowych w biomase roślin

Lata	Makroskładniki					Mikroskładniki			
	N	P	K g kg ⁻¹ s.m.	Mg	Ca	Fe	Mn mg kg ⁻¹ s.m.	Zn	Cu
Zakresy standardowe ¹									
	34,4-48,4	3,0-6,2	28,5-50,6	1,6-2,6	3,9-6,6	149-182	44-99	26-45	4,0-10,0
Doświadczenie nienawadniane									
2020	0	-	-	0	--	+	0	-/S+	0
2021	0	0	0	-/S+	-/S-	0	0/+	-/S+	0
2022	0	0/S-	0/S+	-/0/S+	--	0/S++	0/S-	-/0/S-	0/S+
Doświadczenie nienawadniane									
2020	0	-	-	-/0/S-	0/S+	0/S+	0	-	0/S-
2021	0	0	-	-	--	0/S+	0/S+	0/S+	0
2022	0	-	-/S-	0/S-	0/S-	0	-/S-	-	0

¹Amissach i in. 2023; Legenda, zawartość składników pokarmowych: 0 – w normie; -- – poniżej normy; -/0 – tuż poniżej normy (do 10% różnicy); -- – znacznie poniżej normy (< 50% dolnego zakresu); + – powyżej normy; ++ – znacznie powyżej normy(> 50% górnego zakresu); S1 – siarka elementarna; S2-siarka siarczanowa. Źródło: opracowanie własne.

Załącznik 5.3. Typ zależności między masą całej rośliny i liścia podkolbowego a zawartością składników pokarmowych w kukurydzy w stadium BBCH 61

Wariant wodny	Biomasa	Typ zależności – model regresji prostej	Liść podkolbowy	Typ zależności – model regresji prostej
Obiekt naturalny – nienawadniany	N	Liniowy, słaby ¹ , progresywny	N	Kwadratowy, silny ²
	P, S, K, Na, Mg, Ca, Fe, Mn, Zn, Cu,	Nieistotny lub bardzo słaby ³	S, K, Na	Liniowy, silny, progresywny
			P, Cu, Fe	Liniowy, słaby, degresywny
			Mg	Kwadratowy, słaby
			Ca, Mn, Zn	Nieistotny lub bardzo słaby
Obiekt nawadniany	N	Kwadratowy, silny	N	Kwadratowy, silny
	S, Na, Mg, Ca	Liniowy, silny, progresywny	S, K, Na, Mg, Ca	Liniowy, silny, progresywny
	K	Liniowy, słaby, progresywny	-	
	Cu, P	Liniowy, silny, degresywny	Cu, P	Liniowy, silny, degresywny
	Fe, Mn, Zn	Nieistotny lub bardzo słaby ³	Fe, Mn, Zn,	Nieistotny lub bardzo słaby

¹dla $R^2 = 0,3-0,5$; ²dla $R^2 > 0,5$; ³ $R^2 < 0,2$. Źródło: opracowanie własne.

Załącznik 5.4. Ocena wpływu lat i systemów nawożenia siarką na stan odżywienia kukurydzy w stadium BBCH 61 na podstawie zawartości składników pokarmowych w liściu podkolbowym

Lata	Makroskładniki						Mikroskładniki			
	N	P	K g kg ⁻¹ s.m.	Mg	Ca	S	Fe	Mn mg kg ⁻¹ s.m.	Zn	Cu
Zakresy standardowe ¹										
	27,6-37,5	2,5-5,0	17,5-27,5	1,6-4,0	3,0-6,0	2,1-5,0	20-250*	19-75	19-75	6-20
Doświadczenie nienawadniane										
2020	0	-	--	-/S2+	-	-	0	0	-	-
2021	0	-	--	-/S-	--	--	0	0	-/S+	0
2022	0	--	0	0/S-	--/S-	0	0/S-	-/S+	0	-
Doświadczenie nawadniane										
2020	0	-/0	--	-	--/S+	-	0	0/S2+	-	0
2021	0	0/S-	-	0/S-	--/S-	--	0	0/S1+	-/S+	0
2022	0	-	0	0/S-	0/S-	0	0	0	-/S2+	-/S-

Benton Jones (2003); * - Schulte i Kelling (2000); Legenda, zawartość składników pokarmowych: 0 – w normie; -- – poniżej normy; -/0 – tuż poniżej normy (do 10% różnicy); -- – znacznie poniżej normy (< 50% dolnego zakresu); + – powyżej normy; ++ – znacznie powyżej normy (> 50% górnego zakresu). S1 – siarka elementarna; S2- siarka siarczanowa. Źródło: opracowanie własne.

Załącznik 5.5. Ocena wpływu lat i systemów nawożenia siarką na stan odżywienia kukurydzy w stadium BBCH 61 na podstawie zawartości składników pokarmowych w pędzie

Lata	Makroskładniki					Mikroskładniki				
	N	P	K g kg ⁻¹ s.m.	Mg g kg ⁻¹ s.m.	Ca	Na	Fe	Mn mg kg ⁻¹ s.m.	Zn mg kg ⁻¹ s.m.	Cu
Zakresy standardowe ¹										
	15-25	1-2	20-30	1-3	1-3	1-100	50-100	50-100	20-35*	3-10
Doświadczenie nienawadniane										
2020	0	0	--		-/S-	++	0/S-	-/S-	--	-
2021	0	0	-		--	++	0	0/S-	0	0
2022	0	0	-		0/S-	++	0	0	0	0
Doświadczenie nawadniane										
2020	0	0	--	-/S2-	--	+	-	--	--/S-	--
2021	0	+	-	-/0	--	++	0	0	0	0
2022	0	0	-	0/S-	0/S-	+	0/S-	-/0	-/S-	0

Benton Jones (2003); *inne źródła; Legenda, zawartość składników pokarmowych: 0 – w normie; -- – poniżej normy; -/0 – tuż poniżej normy (do 10% różnicy); -- – znacznie poniżej normy (< 50% dolnego zakresu); + – powyżej normy; ++ – znacznie powyżej normy (> 50% górnego zakresu); S1 – siarka elementarna; S2-siarka siarczanowa. Źródło: opracowanie własne.

Załącznik 5.6. Predykcja plonu i podstawowych elementów struktury plonu na podstawie masy wskaźników gospodarki N w stadium BBCH 14

Cecha /wskaźnik (x)	Elementy struktury plonu	Doświadczenie nienawadniane		Doświadczenie nawadniane	
		R ² ; p	Równanie	R ² , p	Równanie
N _{min14}	PLZ	0,28; 0,01	PLZ = 0,01 + 5,9	0,03; ni	
	LZ	0,2; 0,05	LZ = 1,69x + 2313	0,02; ni	
	MTZ	0,24; 0,05	MTZ = 0,3x + 262	0,06; ni	
NA ₁₄	PLZ	0,21; 0,001	PLZ = 0,1x + 6,1	0,31; 0,001	PLZ = 0,295x + 7,11
	LZ	0,01; ni	-	0,02; ni	-
	MTZ	0,25; 0,001	MTZ = 3,93x + 259	0,32; 0,001	MTZ = 6,6x + 273,8
N _{in14}	PLZ	0,31; 0,01	PLZ = 0,01x + 5,76	0,05; ni	-
	LZ	0,22; 0,05	LZ = 1,686x + 2292	0,03; ni	-
	MTZ	0,27; 0,01	MTZ = 0,31x + 257,4	0,08; ni	-

N_{min14} – masa N_{min} w glebie w stadium BBCH 14; NA₁₄ – masa N zakumulowana przez kukurydzę w pędzie nadziemnym w stadium BBCH 14; N_{in14} – masa N w systemie gleba/roślina w stadium BBCH 14 kukurydzy; PLZ – plon ziarna; LZ – gęstość ziarniaków; MTZ – masa 1000 ziarniaków. Źródło: opracowanie własne.

Załącznik 5.7. Predykcja plonu i podstawowych elementów struktury plonu na podstawie masy wskaźników gospodarki azotem w stadium BBCH 61

Cecha /wskaźnik (x)	Elementy struktury plonu	Doświadczenie nienawadniane		Doświadczenie nawadniane	
		R ² ; p	Równanie	R ² , p	Równanie
N _{min61}	PLZ	0,50; 0,001	PLZ = 0,017x + 5,977	0,01; ni	-
	LZ	0,30; 0,01	LZ = 2,632x + 2344	0,01; ni	-
	MTZ	0,57; 0,001	MTZ = 0,59x + 258	0,06; ni	-
NA ₆₁	PLZ	0,02; ni	-	0,43; 0,001	PLZ = 0,017x + 6,461
	LZ	0,10; ni	-	0,24; 0,01	LZ = 1,921x + 2538,8
	MTZ	0,08; ni	-	0,38; 0,001	MTZ = 0,356x + 263,7
N _{in61}	PLZ	0,33; 0,01	PLZ = 0,01x + 5,1	0,61; 0,001	PLZ = 0,02x + 4,414
	LZ	0,22; 0,05	LZ = 1,6x + 2195,5	0,36; 0,01	LZ = 2,4x + 2247,6
	MTZ	0,44; 0,001	MTZ = 0,37x + 212,6	0,60; 0,001	MTZ = 0,44x + 219,3
N _{g61}	PLZ	0,001; ni	-	0,33; 0,01	PLZ = 0,014x + 7,718
	LZ	0,001; ni	-	0,19; 0,05	LZ = 1,63x + 2638,3
	MTZ	0,33; 0,01	MTZ = 0,01x + 5,1	0,61; 0,001	MTZ = 0,02x + 4,414

N_{min61} – masa N_{min} w glebie w stadium BBCH 61; NA₆₁ – masa N zakumulowana przez kukurydzę w pędzie nadziemnym w stadium BBCH 61; N_{in61} – masa N w systemie gleba/roślina w stadium BBCH 14 kukurydzy; N_{g61} – netto przyrost masy azotu w okresie BBCH 14 do BBCH 61; PLZ – plon ziarna; LZ – gęstość ziarniaków; MTZ – masa 1000 ziarniaków. Źródło: opracowanie własne.

Załącznik 5.8. Predykcja plonu i podstawowych elementów struktury plonu na podstawie masy wskaźników gospodarki azotem w fazie nalewania ziarna

Cecha /wskaźnik (x)	Elementy struktury plonu	Doświadczenie nienawadniane		Doświadczenie nawadniane	
		R ² ; p	Równanie	R ² , p	Równanie
N _{min89}	PLZ	0,33; 0,01	PLZ = 0,17x + 6,261	0,01; ni	-
	LZ	0,16; ni	-	0,01; ni	-
	MTZ	0,35; 0,01	MTZ = 0,58x + 270	0,01; ni	-
NAz	PLZ	0,66; 0,001	PLZ = 0,042x + 2,78	0,76; 0,001	PLZ = 0,0535x + 3,053
	LZ	0,50; 0,001	LZ = 0,16x + 1589	0,55; 0,001	LZ = 6,915x + 2048,7
	MTZ	0,50; 0,001	MTZ = 1,3x + 166,8	0,61; 0,001	MTZ = 1,074x + 197,6
NAc	PLZ	0,28; 0,001	PLZ = 0,005x + 6,096	0,70; 0,001	0,027x + 3,315
	LZ	0,35; 0,001	LZ = 1,4x + 2228	0,40; 0,001	LZ = 3,04x + 2175,5
	MTZ	0,59; 0,001	MTZ = 0,26x + 240,7	0,65; 0,001	MTZ = 0,573x + 194,5
N _{in89}	PLZ	0,43; 0,001	PLZ = 0,0055x + 5,51	0,74; 0,001	PLZ = 0,027x + 1,987
	LZ	0,30; 0,01	LZ = 0,933x + 2249	0,56; 0,001	LZ = 3,558x + 1849
	MTZ	0,65; 0,01	MTZ = 0,223x + 232	0,60; 0,001	MTZ = 0,536x + 181
N _{g89}	PLZ	0,32; 0,01	PLZ = 0,0073x + 6,576	0,03; ni	-
	LZ	0,24; 0,05	LZ = 1,277x + 2423	0,03; ni	-
	MTZ	0,54; 0,001	MTZ = 0,31x + 273,4	0,01; ni	-

N_{min89} – masa N_{min} w glebie w stadium BBCH 89; NA₈₉ – masa N zakumulowana przez kukurydzę w pędzie nadziemnym w stadium BBCH 89; N_{in89} – masa N w systemie gleba/roślina w stadium BBCH 89 kukurydzy; N_{g61} – netto przyrost masy azotu w okresie BBCH 61 do BBCH 89; PLZ – plon ziarna; LZ – gęstość ziarniaków; MTZ – masa 100 ziarniaków. Źródło: opracowanie własne.