

Received: 30.01.2025 / Accepted: 19.03.2025

ARTYKUŁ ORYGINALNY

Wpływ nawożenia doglebowego i aplikacji dolistnej nawozów zawierających krzem i wapń na zdrowotność roślin kukurydzy

Effect of soil fertilization and foliar application of silicon and calcium-containing fertilizers on maize plant health

Arkadiusz Artyszak* , Dariusz Gozdowski , Krzysztof Pagowski , Jerzy Jonczak , Rafał Popielec

Streszczenie

W doświadczeniu przeprowadzonym w miejscowości Kraski (52°2'42"N, 18°54'6"E) w latach 2023–2024 badano wpływ nawożenia doglebowego nawozem zawierającym Si, Ca, Mg i Mn oraz aplikacji dolistnej nawozem zawierającym Si i Ca, oraz połączenia tych kombinacji na zdrowotność roślin kukurydzy przed zbiorem oraz zawartość mykotoksyn w ziarnie. Nawóz doglebowy stosowano w dawce 100, 300 i 500 kg/ha, a dolistny jednorazowo w dawce 1 l/ha. Stwierdzono, że zastosowane kombinacje nawożenia miały korzystny wpływ na ograniczenie porażenia liści, łodyg i kolb przez choroby oraz uszkodzeń łodyg i liści powodowanych przez omacnicę prosowiankę. Najlepsze efekty zapewniało zastosowanie nawozu doglebowego w dawce 500 kg/ha w kombinacji z aplikacją dolistną. Warunki pogodowe w latach badań nie sprzyjały rozwojowi patogenów produkujących mykotoksyny, stąd ich zawartość w ziarnie w większości była poniżej progu oznaczalności.

Słowa kluczowe: choroby kukurydzy, szkodniki kukurydzy, krzem, mykotoksyny, susza, wapń

Abstract

In an experiment conducted at Kraski (52°2'42"N, 18°54'6"E) between 2023 and 2024, the effect of soil fertilization with a fertilizer containing Si, Ca, Mg and Mn, and foliar application with a fertilizer containing Si and Ca, and a combination of these combinations on the pre-harvest health of maize plants and the content of mycotoxins in the grain was studied. The soil fertilizer was applied at 100, 300 and 500 kg/ha, while the foliar fertilizer was applied once at a rate of 1 l/ha. It was found that the applied fertilization combinations had a favourable effect on reducing the infestation of leaves, stems and cobs by diseases and damage to stems and leaves caused by the European corn borer. The best effects were provided by the application of a 500 kg/ha soil fertilizer in combination with a foliar application. Weather conditions during the study years were not favourable for the development of mycotoxin-producing pathogens, hence their content in grain was mostly below the quantification threshold.

Keywords: maize diseases, maize pests, silicon, mycotoxins, drought, calcium

Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie
ul. Nowoursynowska 159, 02-776 Warszawa
*corresponding author: arkadiusz_artyszak@sggw.edu.pl

Wstęp / Introduction

Kukurydza (*Zea mays* L.) jest gatunkiem, który systematycznie zyskuje na znaczeniu gospodarczym w Polsce. W 2024 roku zgłoszono do dopłat bezpośrednich 1,8 mln ha kukurydzy (<https://rejestrpraw.arimr.gov.pl/>). Plonowanie kukurydzy zarówno na ziarno, jak i na kiszonkę, obniżają czynniki abiotyczne (przymrozki, wysokie temperatury, susza, nawalne deszcze, grad, wichury) i biotyczne (chwasty, choroby, szkodniki, w tym ptaki). Jednocześnie strategia Europejskiego Zielonego Ładu wymusza na producentach rolnych ograniczenie nawożenia i stosowania środków ochrony roślin (Komisja Europejska 2020). Czynnikiem, który może ograniczyć wpływ wyżej wymienionych negatywnych czynników jest stosowanie krzemu (Si). Jest to pierwiastek, który w ostatnich dwudziestu latach cieszy się coraz większym zainteresowaniem naukowców (Coskun i wsp. 2019). W uprawie kukurydzy w Polsce korzystne efekty stosowania tego pierwiastka potwierdzili Ciecierski i wsp. (2017), Zamojska i wsp. (2018) oraz Kardasz i wsp. (2024). W badaniach wykorzystywane były głównie produkty przeznaczone do stosowania nalistnego, a brakuje wyników badań z produktami doglebowymi.

Celem doświadczenia była ocena wpływu nawożenia doglebowego oraz aplikacji dolistnej nawozu zawierającego Si i Ca na porażenie roślin kukurydzy przez najważniejsze choroby, uszkodzenia przez omacnicę prosowiankę i zawartość mykotoksyn w ziarnie.

Przyjęto następujące hipotezy badawcze:

1. nawożenie doglebowe i aplikacja dolistna nawozów zawierających Si i Ca ma korzystny wpływ na porażenie roślin kukurydzy przez najważniejsze choroby oraz uszkodzenia przez omacnicę prosowiankę,
2. skuteczność zastosowanych kombinacji nawożenia jest zróżnicowana i wzrasta wraz ze zwiększeniem dawki nawozu doglebowego zawierającego Si i Ca, a najlepsze efekty uzyskuje się stosując kombinację nawozu doglebowego i dolistnego zawierającego Si i Ca,
3. nawożenie doglebowe i aplikacja dolistna nawozów zawierających Si i Ca pozwala ograniczyć zawartość mykotoksyn w ziarnie kukurydzy.

Materiały i metody / Materials and methods

Warunki glebowo-klimatyczne / Soil and climatic conditions

Doświadczenie polowe przeprowadzono w miejscowości Kraski (52°2'42"N, 18°54'6"E) w latach 2023–2024. Kukurydzę uprawiano na glebie sklasyfikowanej jako Cambisols (IUSS Working Group WRB 2022). Charakterystykę warunków glebowych przed założeniem doświadczenia przedstawiono w tabeli 1. Okres wegetacji (maj–wrzesień) w 2024 roku był bardziej sprzyjający dla kukurydzy niż w 2023 roku, ze względu na większą sumę opadów oraz ich rozkład (tab. 2). Szczególnie wysoką średnią temperaturą miesięczną odznaczał się lipiec i sierpień. Kukurydza na ziarno była uprawiana w monokulturze. Po zbiorze przedplonu wykonano talerzowanie broną talerzową na głębokość około 12 cm. Nawożenie przedsiewne przeprowadzono stosując mocznik z inhibitorem ureazy (N – 46%) w dawce odpowiednio: 400 i 200 kg/ha oraz ESTA Kieserit Gran (S – 20%, Mg – 15,1%) – 200 i 100 kg/ha, a także nawóz SiGS. Nawozy zostały wymieszane z glebą na głębokość około 30 cm agregatem do uprawy bezorkowej. Na przełomie kwietnia i maja wykonano siew kukurydzy siewnikiem punktowym Gaspardo z jednoczesnym nawożeniem współrzędnym. Do nawożenia użyto nawóz Polifoska 8 (N – 8%, P – 10,5%, K – 19,7%, S – 3,6%) w dawce 350 i 175 kg/ha. Łącznie nawożenie mineralne wynosiło (na 1 ha) na kombinacji: 100% NPK – N – 212 kg, P – 36,6 kg, K – 68,9 kg, Mg – 30,2 kg i S – 52,8 kg; 50% NPK – N – 106 kg, P – 18,3 kg, K – 34,5 kg, Mg – 15,1 kg i S – 26,4 kg. W obu latach badań wysiano nasiona kukurydzy odmiany DKC3888 (FAO 270). Odmiana ta charakteryzuje się bardzo dobrą zdrowotnością, co deklaruje jej hodowca (www.agro.bayer.com.pl/produkty/kukurydza-dekalb/dkc3888). Norma wysiewu wynosiła 82 tys. nasion na 1 ha, rozstawa międzyrzędzi – 75 cm, a głębokość siewu – 5 cm. Materiał siewny był zaprawiony zaprawą Redigo M 120 FS (s.c. metalaksyl – 20 g/l, protiokonazol – 100 g/l). Do zwalczania chwastów w 2023 roku tuż po siewie użyto herbicydu Lumax 537,5 SE (s.c. mezotrion – 37,5 g/l, s-metolachlor – 312,5 g/l, terbutylazyna – 187,5 g/l) w dawce 3,5 l/ha. Rok

Tabela 1. Warunki glebowe po zbiorze przedplonu pod kukurydzę (2023–2024)

Table 1. Soil conditions after harvesting the forecrop for maize (2023–2024)

Lata Years	Zawartość węgla organicznego Organic carbon content [%]	pH _{KCl}	[mg/kg]										
			N-NO ₃	N-NH ₄	P	K	Mg	B	Cu	Fe	Mn	Zn	Si
2023	0,78	6,4	5,32	2,57	238	181	78,1	0,66	1,94	242	76,1	7,19	61,0
2024	0,73	6,3	4,63	5,66	252	240	79,5	0,28	3,77	286	72,6	7,42	36,2

Tabela 2. Warunki pogodowe w okresie wegetacji kukurydzy (2023–2024)
Table 2. Weather conditions during the growing season of maize (2023–2024)

Miesiąc Month	2023			2024		
	opady precipitation [mm]	średnia temperatura average temperature [°C]	współczynnik hydrotermiczny hydrothermal coefficient	opady precipitation [mm]	średnia temperatura average temperature [°C]	współczynnik hydrotermiczny hydrothermal coefficient
Maj – May	42,5	13,3	1,03	22,6	16,8	0,43
Czerwiec – June	72,7	18,3	1,32	108,8	19,0	1,91
Lipiec – July	59,1	20,1	0,95	101,3	20,9	1,56
Sierpień – August	93,8	20,8	1,45	112,5	20,5	1,77
Wrzesień – September	24,2	18,0	0,45	83,5	16,7	1,67
Suma – Sum	292,3	–	–	428,7	–	–

Źródło: obliczenia własne na podstawie danych eDWIN (<https://www.edwin.gov.pl/dane-agrometeorologiczne>) dla Stacji Zduny
 Source: own study based on data from eDWIN (<https://www.edwin.gov.pl/dane-agrometeorologiczne>) for Station Zduny

później zastosowano Metodus 650 WG (s.cz. izoksafutol – 100 g/kg, mezotrión – 150 g/kg, terbutylazyna – 400 g/kg) w dawce 0,5 kg + Metos 960 EC (s.cz. S-metolachlor – 960 g/l). Nie prowadzono zabiegów chemicznych przeciw chorobom i szkodnikom.

Metodyka / Methodology

Doświadczenie było doświadczeniem dwuczynnikowym założonym w układzie losowanych bloków, w 4 powtórzeniach. Pierwszym czynnikiem (A) była dawka NPK: 100% w technologii gospodarstwa (bez ingerencji zespołu badawczego) i 50%, a drugim (B) sposób nawożenia krzemem doglebowo i dolistnie (tab. 3). Łączna liczba kombinacji wynosiła 16, a łączna powierzchnia doświadczenia 4,0 ha. W doświadczeniu zastosowano nawóz doglebowy SiGS (Si – 20%, Ca – 18,1%, Mg – 4,6%, Mn – 4,5%) (Eramet, Norway) oraz nawóz dolistny Barrier Si-Ca (Si – 336 g/l, Ca – 207 g/l) (Cosmolcel, Mexico). Obecnie produkt SiGS jest jeszcze niedostępny w Unii Europejskiej, ale jest szeroko stosowany w innych rejonach świata w uprawie ryżu i trzciny cukrowej. W Norwegii jest też dopuszczony do stosowania w rolnictwie. SiGS to czysty żużel z procesu wytopienia elektrycznego do produkcji metalu SiMn. Jest to zielony, szklisty, amorficzny materiał składający się głównie z Si, Ca, Mg i Mn. Produkt nie zawiera szkodliwych pierwiastków, a zawartość metali ciężkich jest śladowa, znacznie poniżej poziomów progowych określonych dla nawozów. W procesie produkcji żużel jest schładzany i mielony. Nawóz SiGS w 98–99% jest amorficzny (Hansen 2025). Aplikację dolistną nawozu Barrier Si-Ca wykonano zgodnie ze schematem doświadczenia w pierwszej dekadzie czerwca. Dawka cieczy roboczej wynosiła 300 l/ha.

Przed zbiorem kukurydzy na ziarno przeprowadzono ocenę porażenia roślin przez choroby oraz uszkodzenia spowodowane przez omacnicę prosowiankę zgodnie z Metody-

ką badania wartości gospodarczej odmian (COBORU 2020). Ocenę zawartości mykotoksyn (aflatoksyna B1, B2, G1, G2, suma aflatoksyn B + G, ochratoksyna A, deoksyniwalenol i zearelon) w ziarnie wykonano w laboratorium SGS Polska Pracownia Badań Żywności w Ołtarzewie metodą SOP M 3650, LC-MS/MS. Z każdej kombinacji pobrano do badań po 2 próbki ziarna.

Uzyskane wyniki z doświadczenia poddano analizie statystycznej wykorzystując analizę wariancji i porównania wielokrotne procedurą Tukeya. Do porównania średnich przyjęto poziom istotności $p = 0,05$. Na tej podstawie wydzielono grupy jednorodnie średnich, które oznaczono kolejnymi literami alfabetu. Analizy przeprowadzono za pomocą programu Statistica 13 (TIBCO Software Inc.).

Wyniki i dyskusja / Results and discussion

Krzem łagodzi u roślin wpływ stresów wywoływanych zarówno przez czynniki abiotyczne, jak i biotyczne (Ullah i wsp. 2024). W roślinach kukurydzy krzem ogranicza szkodliwe oddziaływanie suszy (Aqaei i wsp. 2020; Ning i wsp. 2020; Abd El-Mageed i wsp. 2021; Bijanzadeh i wsp. 2022), zasolenia (Ullah i wsp. 2025), czy metali ciężkich (Ahmed i wsp. 2023). Udowodniono, że odbywa się to przez pozytywne modulowanie atrybutów fizjologicznych roślin uprawnych. Kluczową rolą jest regulacja fitohormonów i ich kaskad sygnalizacyjnych (Mir i wsp. 2022). W literaturze szeroko opisywany jest wpływ krzemu na ograniczanie porażenia roślin przez choroby grzybowe (Fauteux i wsp. 2005). Z gatunków roślin uprawianych w Polsce korzystny wpływ stosowania krzemu na zdrowotność roślin stwierdzono w przypadku takich gatunków roślin, jak: burak cukrowy (Artyszak 2021), rośliny bobowate (Moraes i wsp. 2009; Polanco i wsp. 2012), pszenica (Bélanger i wsp. 2003; Rodgers-Gray i Shaw 2004; Guével i wsp. 2007; Dorneles i wsp. 2017), tymotka łąkowa (Radkowski i Radkowska

Tabela 3. Schemat doświadczenia (2023–2024)**Table 3.** Scheme of the experiment (2023–2024)

Nr wariantu Variant no.	Dawka SiGS Dose of SiGS [kg/ha]	Dawka Barrier Si-Ca Dose of Barrier Si-Ca [l/ha]	Łączna dawka składników Total dose of elements [kg/ha]
100% NPK (A1)			
B1	–	–	–
B2	100	–	Si – 20; Ca – 18,1; Mg – 4,6; Mn – 4,5
B3	300	–	Si – 60; Ca – 54,3; Mg – 13,8; Mn – 13,5
B4	500	–	Si – 100; Ca – 90,5; Mg – 23; Mn – 22,5
B5	–	1	Si – 0,34; Ca – 0,21
B6	100	1	Si – 20,3; Ca – 18,3; Mg – 4,6; Mn – 4,5
B7	300	1	Si – 60,3; Ca – 54,5; Mg – 13,8; Mn – 13,5
B8	500	1	Si – 100,3; Ca – 90,7; Mg – 23; Mn – 22,5
50% NPK (A2)			
B1	–	–	–
B2	100	–	Si – 20; Ca – 18,1; Mg – 4,6; Mn – 4,5
B3	300	–	Si – 60; Ca – 54,3; Mg – 13,8; Mn – 13,5
B4	500	–	Si – 100; Ca – 90,5; Mg – 23; Mn – 22,5
B5	–	1	Si – 0,34; Ca – 0,21
B6	100	1	Si – 20,3; Ca – 18,3; Mg – 4,6; Mn – 4,5
B7	300	1	Si – 60,3; Ca – 54,5; Mg – 13,8; Mn – 13,5
B8	500	1	Si – 100,3; Ca – 90,7; Mg – 23; Mn – 22,5

2018) oraz ziemniak (Soratto i wsp. 2012). Wyniki badań dotyczących wpływu stosowania krzemu na zdrowotność roślin kukurydzy są nieliczne. W Polsce roślinom kukurydzy zagraża około 400 patogenów, które są odpowiedzialne za rozwój wielu chorób. Aktualnie najliczniejszą, a zarazem najgroźniejszą grupę stanowią grzyby patogeniczne (Bereś i wsp. 2023). Bereś i wsp. (2022) analizując występowanie chorób kukurydzy powodowanych przez grzyby na polach prowadzonych w wieloletniej monokulturze w południowo-wschodniej Polsce w latach 2010–2021 za najgroźniejsze uznali: fuzariozę kolb, zgniliznę korzeni i zgorzel podstawy łodygi, a także głownię kukurydzy. Często obecności występowania objawów tych chorób sprzyjały szkodniki oraz warunki pogodowe. Spośród chorób liści najpowszechniej notowano drobną plamistość liści. W niższym nasileniu pojawiła się żółta plamistość liści i rdza kukurydzy. Lata badań oraz nawożenie krzemem miały istotny wpływ na porażenie roślin przez wszystkie oceniane choroby oraz uszkodzenia powodowane przez omacnicę prosowiankę (tab. 4). Dawka NPK istotnie różnicowała porażenie roślin przez bakteryjną plamistość pochw liści, łodyg i kolb przez fuzariozę oraz łodyg przez głownię kukurydzy. Porażenie kolb przez fuzariozę było istotnie zależne od współdziałania dawki NPK i nawożenia krzemem.

Porażenie roślin kukurydzy przez bakteryjną plamistość pochw liściowych przed zbiorem w obu latach badań było istotnie mniejsze na kombinacjach z mniejszą dawką NPK niż z pełną, a roślin na kombinacjach B4, B6–B8 niż na kombinacji B1 (tab. 5). Udział porażonych przez fuzario-

zę kolb na obiektach z pełnym nawożeniem NPK był istotnie mniejszy niż z nawożeniem ograniczonym o połowę (tab. 6). W każdym z lat badań wszystkie kombinacje nawożenia krzemem odznaczały się istotnie mniejszym porażeniem kolb w stosunku do obiektu kontrolnego B1. W 2024 roku udział porażonych przez fuzariozę łodyg na obiektach z pełnym nawożeniem NPK był istotnie mniejszy niż z nawożeniem ograniczonym o połowę. W każdym z lat badań wszystkie kombinacje nawożenia krzemem odznaczały się istotnie mniejszym porażeniem łodyg niż wariant B1. W latach 2023–2024 udział porażonych przez głownię kukurydzy kolb na kombinacjach B3–B8 był istotnie mniejszy niż na kombinacji B1 (tab. 7). W obu latach badań udział porażonych przez głownię kukurydzy łodyg na obiektach z pełnym nawożeniem NPK był istotnie większy niż z nawożeniem ograniczonym o połowę, a udział porażonych łodyg na kombinacjach B3–B8 był istotnie mniejszy niż na kombinacji B1. Zaobserwowane zmniejszenie porażenia roślin kukurydzy pod wpływem zastosowanych nawozów było wynikiem najprawdopodobniej wielokierunkowego działania krzemu. Jak wskazują wyniki wcześniejszych badań pierwiastek ten działa w roślinie na kilku poziomach. Może wpływać na metabolizm, fizjologię i funkcje komórkowe roślin (Ullah i wsp. 2024). Krzem stymuluje mechanizmy antyoksydacyjne, chroni maszynę fotosyntezy, utrzymuje równowagę jonową i wchłanianie składników pokarmowych, promuje produkcję metabolitów wtórnych, wspomaga fotosyntezę, redukuje ROS i pomaga w chelatacji toksycznych metali. Dodatkowo, krzem modyfikuje

Tabela 4. Wartości p na podstawie analizy wariancji dla ocenianych cech zdrowotności roślin (2023–2024)**Table 4.** p-values based on analysis of variance for the plant health traits assessed (2023–2024)

Cecha Trait	Lata badań Years of study (Y)	Dawka NPK Dose NPK (A)	Kombinacja nawożenia Si Combination of Si ferti- lization (B)	Y × A	Y × B	A × B	Y × A × B
Porażenie roślin przez bakteryjną plamistość pochw liściowych (<i>Pseudomonas</i> spp.) Infection of plants by bacterial leaf spot (<i>Pseudomonas</i> spp.)	<0,05	<0,05	<0,05	0,104	0,349	0,558	0,170
Porażenie roślin przez fuzariozę (<i>Fusarium</i> spp.) Infection of plants by fusariosis (<i>Fusarium</i> spp.)							
Kolby – Cobs	<0,05	<0,05	<0,05	0,485	0,954	<0,05	0,935
Łodygi – Stalks	<0,05	<0,05	<0,05	0,633	0,079	0,254	0,999
Porażenie roślin przez głownię kukurydzy [<i>Ustilago maydis</i> (DC.) Corda] Infestation of plants by maize head [<i>Ustilago maydis</i> (DC.) Corda]							
Kolby – Cobs	<0,05	0,069	<0,05	0,802	0,291	0,120	0,988
Łodygi – Stalks	<0,05	<0,05	<0,05	0,919	0,792	0,137	0,989
Uszkodzenia roślin przez omacnicę prosowiankę (<i>Ostrinia nubilalis</i> Hbn) Damage to plants by the European corn borer (<i>Ostrinia nubilalis</i> Hbn)	<0,05	0,469	<0,05	0,573	0,516	0,473	0,998

Tabela 5. Porażenie roślin przez bakteryjną plamistość pochw liściowych (*Pseudomonas* spp.) przed zbiorem w zależności od dawki NPK (A) i nawożenia krzemem (B) (2023–2024) [w skali 9-stopniowej]**Table 5.** Infection of plants by bacterial leaf spot (*Pseudomonas* spp.) before harvest as a function of NPK dose (A) and silicon fertilization (B) (2023–2024) [on a 9-point scale]

Wariant ¹ Variant ¹	Dawka NPK – Dose NPK		
	A1	A2	średnia – mean
2023			
B1	7,50 a ²	7,57 abc	7,53 A
B2	7,53 ab	7,60 bcd	7,57 AB
B3	7,57 abc	7,57 abc	7,57 AB
B4	7,60 bcd	7,67 de	7,63 BC
B5	7,53 ab	7,63 cde	7,58 AB
B6	7,67 de	7,67 de	7,67 C
B7	7,67 de	7,70 e	7,68 C
B8	7,67 de	7,70 e	7,68 C
Średnia – Mean	7,59 A	7,64 B	–
2024			
B1	7,18 ab	7,11 a	7,14 A
B2	7,21 abc	7,27 abc	7,24 AB
B3	7,21 abc	7,25 abc	7,23 AB
B4	7,28 bc	7,37 cde	7,32 BC
B5	7,21 abc	7,28 bc	7,24 AB
B6	7,31 bc	7,53 e	7,42 C
B7	7,34 bcd	7,54 e	7,44 C
B8	7,31 bc	7,50 de	7,41 C
Średnia – Mean	7,25 A	7,36 B	–

¹ jak w tabeli 3; ² te same małe litery oznaczają brak istotnych różnic między kombinacjami wielkości dawki NPK i kombinacji nawożenia Si, natomiast te same duże litery oznaczają brak istotnych różnic między średnimi dla kombinacji nawożenia Si (dotyczy to ostatniej kolumny) lub między średnimi dla wielkości dawek NPK (porównania w wierszach). Wszystkie średnie są porównywane przy p = 0,05

¹ as in table 3; ² the same lower case letters indicate no significant differences between NPK and Si fertilization rate combinations, while the same upper case letters indicate no significant differences between the averages for Si fertilization rate combinations (this applies to the last column) or between the averages for NPK rate combinations (row comparisons). All averages are compared at p = 0.05

Tabela 6. Porażenie roślin przez fuzariozę (*Fusarium* spp.) przed zbiorem w zależności od dawki NPK (A) i nawożenia krzemem (B) (2023–2024) [% porażonych kolb, łodyg]

Table 6. Infection of plants by cob fusariosis (*Fusarium* spp.) before harvest depending on NPK dose (A) and silicon fertilisation (B) (2023–2024) [% of cobs, stalks infected]

Wariant ¹ Variant ¹	Dawka NPK – Dose NPK					
	A1		A2		średnia – mean	
	kolby cobs	łodygi stalks	kolby cobs	łodygi stalks	kolby cobs	łodygi stalks
2023						
B1	5,60 fg ²	4,53 i	5,63 g	4,53 i	5,62 F	4,53 G
B2	5,37 de	4,23 h	5,53 fg	4,13 gh	5,45 E	4,18 F
B3	5,30 cd	4,03 fgh	5,30 cd	3,93 fg	5,30 CD	3,98 E
B4	5,20 bc	3,63 de	5,27 cd	3,43 d	5,23 BC	3,53 D
B5	5,27 cd	3,90 fg	5,50 efg	3,80 ef	5,38 DE	3,85 E
B6	5,17 bc	2,50 c	5,47 ef	2,53 c	5,32 CD	2,52 C
B7	5,07 ab	2,20 b	5,30 cd	2,00 b	5,18 B	2,10 B
B8	4,93 a	1,63 a	5,17 bc	1,63 a	5,05 A	1,63 A
Średnia – Mean	5,24 A	3,33 A	5,40 B	3,25 A	–	
2024						
B1	5,21 g	4,31 l	5,17 g	4,23 l	5,19 D	4,27 H
B2	4,95 de	4,03 k	5,11 fg	3,87 j	5,03 C	3,95 G
B3	4,89 d	3,80 ij	4,89 d	3,70 hi	4,89 B	3,75 F
B4	4,86 cd	3,42 f	4,86 cd	3,19 e	4,86 B	3,30 D
B5	4,92 d	3,64 gh	5,04 ef	3,54 fg	4,98 C	3,59 E
B6	4,75 bc	2,45 d	5,05 ef	2,42 d	4,90 B	2,44 C
B7	4,65 ab	2,16 c	4,89 d	2,00 b	4,77 A	2,08 B
B8	4,55 a	1,54 a	4,85 cd	1,54 a	4,70 A	1,54 A
Średnia – Mean	4,85 A	3,17 B	4,98 B	3,06 A	–	

¹ jak w tabeli 3; ² te same małe litery oznaczają brak istotnych różnic między kombinacjami wielkości dawki NPK i kombinacji nawożenia Si, natomiast te same duże litery oznaczają brak istotnych różnic między średnimi dla kombinacji nawożenia Si (dotyczy to ostatniej kolumny) lub między średnimi dla wielkości dawek NPK (porównania w wierszach). Wszystkie średnie są porównywane przy p = 0,05

¹ as in table 3; ² the same lower case letters indicate no significant differences between NPK and Si fertilization rate combinations, while the same upper case letters indicate no significant differences between the averages for Si fertilization rate combinations (this applies to the last column) or between the averages for NPK rate combinations (row comparisons). All averages are compared at p = 0.05

Tabela 7. Porażenie roślin przez głownię kukurydzy [*Ustilago maydis* (DC.) Corda] przed zbiorem w zależności od dawki NPK (A) i nawożenia krzemem (B) (2023–2024) [% porażonych kolb, łodyg]

Table 7. Infestation of plants by maize head [*Ustilago maydis* (DC.) Corda] before harvest depending on NPK dose (A) and silicon fertilisation (B) (2023–2024) [% of cobs, stalks infested]

Wariant ¹ Variant ¹	Dawka NPK – Dose NPK					
	A1		A2		średnia – mean	
	kolby cobs	łodygi stalks	kolby cobs	łodygi stalks	kolby cobs	łodygi stalks
2023						
B1	0,43 i ²	0,77 h	0,40 hi	0,67 gh	0,42 D	0,72 D
B2	0,37 ghi	0,67 gh	0,40 hi	0,63 fg	0,38 D	0,65 D
B3	0,30 efg	0,57 efg	0,30 efg	0,50 cde	0,30 C	0,53 C
B4	0,30 efg	0,53 def	0,23 cde	0,47 bcde	0,27 BC	0,50 C
B5	0,33 fgh	0,57 efg	0,27 def	0,53 def	0,30 C	0,55 C
B6	0,20 bcd	0,53 def	0,23 cde	0,43 abcd	0,22 B	0,48 BC
B7	0,17 abc	0,40 abc	0,13 ab	0,43 abcd	0,15 A	0,42 AB
B8	0,13 ab	0,33 a	0,10 a	0,37 ab	0,12 A	0,35 A
Średnia – Mean	0,28 A	0,55 B	0,26 A	0,50 A	–	

Tabela 7. Porażenie roślin przez głownię kukurydzy [*Ustilago maydis* (DC.) Corda] przed zbiorem w zależności od dawki NPK (A) i nawożenia krzemem (B) (2023–2024) [% porażonych kolb, łodyg] – cd.**Table 7.** Infestation of plants by maize head [*Ustilago maydis* (DC.) Corda] before harvest depending on NPK dose (A) and silicon fertilisation (B) (2023–2024) [% of cobs, stalks infested] – continued

Wariant ¹ Variant ¹	Dawka NPK – Dose NPK					
	A1		A2		średnia – mean	
	kolby cobs	łodygi stalks	kolby cobs	łodygi stalks	kolby cobs	łodygi stalks
2024						
B1	0,35 g	0,61 h	0,28 fg	0,49fg	0,31 E	0,55 C
B2	0,25 ef	0,51 g	0,28 fg	0,49 fg	0,27 DE	0,50 C
B3	0,19 bcdef	0,45 efg	0,19 bcdef	0,40 cde	0,19 C	0,43 B
B4	0,24 ef	0,40 cde	0,17 abcde	0,34 bc	0,20 C	0,37 B
B5	0,23 def	0,43 def	0,20 cdef	0,40 cde	0,21 CD	0,41 B
B6	0,14 abcd	0,40 cde	0,17 abcde	0,35 bcd	0,15 BC	0,37 B
B7	0,11 abc	0,31ab	0,11 ab	0,31 ab	0,11 AB	0,31 A
B8	0,09 a	0,27 ab	0,08 a	0,25 a	0,08 A	0,26 A
Średnia – Mean	0,20 A	0,42 B	0,18 A	0,38 A	–	–

¹ jak w tabeli 3; ² te same małe litery oznaczają brak istotnych różnic między kombinacjami wielkości dawki NPK i kombinacji nawożenia Si, natomiast te same duże litery oznaczają brak istotnych różnic między średnimi dla kombinacji nawożenia Si (dotyczy to ostatniej kolumny) lub między średnimi dla wielkości dawek NPK (porównania w wierszach). Wszystkie średnie są porównywane przy $p = 0,05$

¹ as in table 3; ² the same lower case letters indicate no significant differences between NPK and Si fertilization rate combinations, while the same upper case letters indicate no significant differences between the averages for Si fertilization rate combinations (this applies to the last column) or between the averages for NPK rate combinations (row comparisons). All averages are compared at $p = 0.05$

Tabela 8. Uszkodzenia roślin przez omacnicę prosowiankę (*Ostrinia nubilalis* Hbn) przed zbiorem w zależności od dawki NPK (A) i nawożenia krzemem (B) (2023–2024) [% uszkodzonych łodyg]**Table 8.** Damage to plants by the European corn borer (*Ostrinia nubilalis* Hbn) before harvest depending on NPK dose (A) and silicon fertilisation (B) (2023–2024) (% of damaged stalks)

Wariant ¹ Variant ¹	Dawka NPK – Dose NPK		
	A1	A2	średnia – mean
	2023		
B1	13,33 d ²	13,50 d	13,42 E
B2	13,23 d	13,43 d	13,33 DE
B3	12,73 bcd	12,33 abc	12,53 BC
B4	12,43 abc	12,83 bcd	12,63 BC
B5	12,80 bcd	12,83 bcd	12,82 BCD
B6	13,03 cd	12,90 bcd	12,97 CDE
B7	12,33 abc	12,23 ab	12,28 AB
B8	12,13 ab	11,83 a	11,98 A
Średnia – Mean	12,75 A	12,74 A	–
2024			
B1	17,92 g	17,55 fg	17,73 E
B2	17,37 efg	17,46 fg	17,42 DE
B3	16,55 bcde	16,03 abc	16,29 BC
B4	16,16 abcd	16,68 cdef	16,42 BC
B5	17,17 efg	17,07 efg	17,12 DE
B6	16,94 def	16,77 cdef	16,86 CD
B7	16,03 abc	15,90 abc	15,97 AB
B8	15,77 ab	15,38 a	15,58 A
Średnia – Mean	16,74 A	16,61 A	–

¹ jak w tabeli 3; ² te same małe litery oznaczają brak istotnych różnic między kombinacjami wielkości dawki NPK i kombinacji nawożenia Si, natomiast te same duże litery oznaczają brak istotnych różnic między średnimi dla kombinacji nawożenia Si (dotyczy to ostatniej kolumny) lub między średnimi dla wielkości dawek NPK (porównania w wierszach). Wszystkie średnie są porównywane przy $p = 0,05$

¹ as in table 3; ² the same lower case letters indicate no significant differences between NPK and Si fertilization rate combinations, while the same upper case letters indicate no significant differences between the averages for Si fertilization rate combinations (this applies to the last column) or between the averages for NPK rate combinations (row comparisons). All averages are compared at $p = 0.05$

ściany komórkowe roślin i reguluje ekspresję genów tolerancji na stres. Oczywiście jest, że gromadzenie się krzemu w łodygach i liściach powoduje większość korzystnych efektów. Jednak większość gatunków roślin nie jest w stanie zgromadzić znacznych ilości krzemu w pędach. Szymańska i wsp. (2012) nie zaobserwowali istotnego wpływu stosowania nawozu doglebowego PRP SOL (30% CaO, 8% MgO, 3,5% Na, 48 pierwiastków śladowych) na występowanie wybranych chorób i szkodników kukurydzy w porównaniu do obiektu kontrolnego, co mogło być spowodowane niską presją ze strony badanych gatunków szkodliwych. Na obiektach nawożonych PRP SOL zauważono tendencję do mniejszego porażenia roślin kukurydzy przez grzyby z rodzaju *Fusarium*. Autorzy tłumaczą to tym, że na obiektach nawożonych PRP SOL w porównaniu do obiektu kontrolnego nawożonego tradycyjnymi nawozami mineralnymi, wystąpiło lepsze zaopatrzenie roślin w potas i fosfor, co ułatwiło roślinom przezwyciężenie presji patogenów.

Zamojska i wsp. (2018) stwierdzili zmniejszenie porażenia roślin kukurydzy przez choroby grzybowe na skutek aplikacji dolistnej stymulatora Optysil (krzemian sodu + chelat żelaza). Produkt stosowano w dawce 0,5 l/ha trzykrotnie w okresie wegetacji (BBCH 12–16, 18–20 i 19–39), w dwóch wariantach: z fungicydem Retengo Plus 183 SE (s.c. piraklostrobina i epoksykonazol) w dawce 1 l/ha w stadium BBCH 39 i bez, a efekty porównywano z kontrolą (bez stymulatora i ochrony fungicydowej). Aplikacja stymulatora zmniejszyła porażenie roślin przez choroby grzybowe o 80–100% (podobne wyniki uzyskano stosując go z lub bez fungicydu). W rejonie silnej presji infekcyjnej *Cercospora beticola* Sacc. w uprawie buraka cukrowego na południowym wschodzie kraju, 3-krotna aplikacja dolistna nawozu Barrier Si-Ca ograniczyła porażenie roślin przez chwościka buraka, co przełożyło się na istotny wzrost plonów korzeni, biologicznego i technologicznego cukru w stosunku do obiektu kontrolnego (bez nawozu dolistnego i ochrony fungicydowej). Najlepsze efekty uzyskano w kombinacji obejmującej 3-krotną aplikację dolistną nawozu Barrier Si-Ca i 4-krotne zastosowanie fungicydów (Artyszak 2021). O korzystnych efektach stosowania nawozu SiGS w warunkach Polski w 2021 roku w uprawie buraka cukrowego informowali Artyszak i Hansen (2022). Omacnica prosowianka występuje aktualnie na obszarze całego kraju i uznawana jest za najgroźniejszego szkodnika kukurydzy (Bereś i wsp. 2023). W 2023 roku rośliny na kombinacjach B3, B4, B5, B7 i B8, a w 2024 roku na kombinacjach B3, B4, B6–B8 odznaczały się istotnie mniejszymi uszkodzeniami spowodowanymi przez omacnicę prosowiankę niż na kombinacji B1 (tab. 8). W 2024 roku zaobserwowano zwiększone występowanie mszyc, ale nie miały one większego wpływu na zdrowotność kukurydzy. Spośród ocenianych cech zdrowotności roślin przed zbiorem największą zmiennością odznaczało się porażenie kolb przez głównię kukurydzy (współ. zmien. = 45,39%), a najmniejszą przez bakteryjną plamistość pochew liściowych (współ. zmien. =

2,62%). Najwcześniejsze doniesienia o pośredniej roli krzemu w kształtowaniu odporności na szkodniki datowane są na 1920 rok i odnoszą się do muszki heskiej w pszenicy (McColloch i Salmon 1923). Goussain i wsp. (2002) badali wpływ doglebowego stosowania krzemianu sodu na rozwój *Spodoptera frugiperda*, który podlega obowiązkowi zwalczania w Polsce. Nie zaobserwowano wpływu stosowania krzemu na długość fazy larwalnej oraz fazy poczwarki, jak i na masę poczwerek oraz ich śmiertelność. Odnotowano jednak zwiększoną śmiertelność i kanibalizm w grupach znajdujących się pod koniec 2. stadium larwalnego, a także zwiększoną śmiertelność larw w 2. oraz w 6. stadium, żerujących na liściach kukurydzy traktowanej krzemem. Ponadto żuchwy szczęk larw 6. stadium wykazywały wyraźne zużycie w okolicy siecznej w kontakcie z liśćmi o wyższej zawartości krzemu. Stąd wysunięto wniosek, że stosowanie krzemu może utrudniać odżywianie się larw *S. frugiperda* powodując ich większą śmiertelność i kanibalizm, a co za tym idzie zwiększać odporność roślin na ten gatunek. Hanciaux (2019) badał wpływ zwiększonej akumulacji krzemu w roślinach kukurydzy na zachowanie i rozwój światłówki naziemnicy (*Spodoptera exigua*). Wykazał, że krzem modyfikuje zachowanie larw w 5. stadium rozwoju, które wolały spożywać liście pozbawione tego pierwiastka. Spożywanie liści bogatych w krzem powodowało, że konwersja pokarmu w masę ciała była mniej wydajna, a zawartość tłuszczu mniejsza. Utrudniało to wzrost larw, opóźniało ich nimfozę i zwiększało śmiertelność larw w pierwszym stadium larwalnym. Śmiertelność i czas trwania stadiów larwalnych nie ulegały zmianie, gdy krzem był dostarczany roślinom w niewystarczających ilościach, co tylko potwierdziło jego duże znaczenie w podnoszeniu odporności roślin na agrofagi. W badaniach Zamojskiej i wsp. (2018) wpływ stosowania dolistnego stymulatora Optysil na liczebność roślin uszkodzonych przez zachodnią kukurydzianą stonkę korzeniową był odmienny w latach badań. W 2014 roku zastosowanie łącznie z fungicydem pozwoliło ograniczyć uszkodzenia do 7%, a bez do 9% (kontrola = 21%). W 2015 roku w wariantcie stymulator + fungicyd uszkodzonych było 45% roślin, gdy na kontroli 27,1% (brak danych dla obiektu tylko ze stymulatorem). Zawartość mykotoksyn aflatoksyny B1, B2, G1, G2, ich sumy oraz ochratoksyny A w każdej z kombinacji w obu latach badań była poniżej progu oznaczalności (0,2 µg/kg dla aflatoksyny B1, B2, G1, G2, sumy B1, B2, G1, G2 oraz 0,5 µg/kg dla ochratoksyny A). Lata badań, dawka NPK, kombinacja nawożenia krzemem oraz współdziałanie tych czynników nie miało istotnego wpływu na zawartość mykotoksyn DON i ZEA w ziarnie kukurydzy. Bardzo mała zawartość mykotoksyn w ziarnie była spowodowana niekorzystnym przebiegiem warunków pogodowych w latach badań do rozwoju patogenów, które te mykotoksyny produkują. W 2023 roku zawartość mykotoksyny DON w ziarnie z wariantu A1B1 była istotnie większa niż w pozostałych wariantach. W 2024 roku zawartość DON w ziarnie jedynie z kombinacji A1B8 przekroczyła próg oznaczalności i wy-

nosiła 225,5 µg/kg. Zawartość mykotoksyny ZEA w ziarnie w 2023 roku na obiekcie A1B1 wynosiła 18,85 µg/kg, A1B2 – 5,35 µg/kg, A1B3 – 6,7 µg/kg, A1B4 – 20,4 µg/kg, a na obiektach A2B3 – 5,35 µg/kg oraz A2B7 – 9,15 µg/kg (w pozostałych przypadkach była poniżej progu oznaczalności). Rok później we wszystkich kombinacjach była poniżej progu oznaczalności, a jedynie w kombinacji A1B8 wynosiła 12,55 µg/kg. W przypadku zawartości mykotoksyny DON odchylenie standardowe wynosiło 68,20 µg/kg, a mykotoksyny ZEA – 2,67 µg/kg. Współczynnik zmienności miał wartość odpowiednio: 292,9% i 48,8%. W badaniach Ciecierskiego i wsp. (2017) stosowanie dolistne produktu Optysil (krzemian sodu + chelat żelaza) w dawkach: 0,5; 1 i 2 l/ha trzykrotnie: w fazie BBCH 14, 17 i 19–39 spowodowało ograniczenie zawartości mykotoksyny DON o 82,8% (przy dawce 0,5 l/ha), o 89,0% (1 l/ha) i o 90,8% (2 l/ha), a ZEA odpowiednio o: 96,7; 99,1 oraz 98,4%. W ziarnie z poletek kontrolnych zawartość mykotoksyny DON wynosiła 277 µg/kg, a mykotoksyny ZEA – 173 µg/kg. W 2024 roku w Unii Europejskiej zaostrożono wymagania dotyczące dopuszczalnej zawartości mykotoksyny DON w żywności, w tym w ziarnie kukurydzy (Rozporządzenie Komisji 2024).

Wnioski / Conclusions

1. Zarówno nawożenie doglebowego nawozem zawierającym Si i Ca, aplikacja dolistna produktu zawierającego oba te pierwiastki oraz połączenie obu tych metod aplikacji ma korzystny wpływ na ograniczenie porażenia roślin kukurydzy przez najważniejsze choroby i uszkodzenia powodowane przez omacnicę prosowiankę.

2. Najlepsze efekty poprawy zdrowotności roślin pozwala uzyskać zastosowanie badanego nawozu doglebowego w dawce 500 kg/ha w kombinacji z aplikacją dolistną produktu zawierającego Si i Ca w dawce 1 l/ha.

3. Wpływ nawozu doglebowego zawierającego Si i Ca, aplikacja dolistna produktu zawierającego oba te pierwiastki na zawartość mykotoksyn w ziarnie kukurydzy jest niejednoznaczny.
4. Konieczne jest przeprowadzenie kolejnych badań w zróżnicowanych warunkach glebowo-klimatycznych w celu dalszej weryfikacji uzyskanych wyników badań.

Finansowanie / Funding

Europejski Fundusz Rolny na rzecz Rozwoju Obszarów Wiejskich: Europa inwestująca w obszary wiejskie. Instytucja Zarządzająca Programem Rozwoju Obszarów Wiejskich na lata 2014–2020 – Minister Rolnictwa i Rozwoju Wsi. Projekt współfinansowany ze środków Unii Europejskiej w ramach działania „Współpraca” Programu Rozwoju Obszarów Wiejskich na lata 2014–2020. Umowa nr 00096.DDD.6509.00151.2022.05 z dnia 13.11.2023 r.



SZKOŁA GŁÓWNA
GOSPODARSTWA
WIEJSKIEGO



Literatura / References

- Abd El-Mageed T.A., Shaaban A., Abd El-Mageed S.A., Semida W.M., Rady M.O.A. 2021. Silicon defensive role in maize (*Zea mays* L.) against drought stress and metals-contaminated irrigation water. *Silicon* 13: 2165–2176. DOI: 10.1007/s12633-020-00690-0
- Ahmed S., Iqbal M., Ahmad Z., Iqbal M.A., Artyszak A., Sabagh A.E.L., Alharby H.F., Hossain A. 2023. Foliar application of silicon-based nanoparticles improve the adaptability of maize (*Zea mays* L.) in cadmium contaminated soils. *Environmental Science and Pollution Research* 30: 41002–41013. DOI: 10.1007/s11356-023-25189-0
- Aqaei P., Weisany W., Diyanat M., Razmi J., Struik P.C. 2020. Response of maize (*Zea mays* L.) to potassium nano-silica application under drought stress. *Journal of Plant Nutrition* 43 (9): 1205–1216. DOI: 10.1080/01904167.2020.1727508
- Artyszak A. 2021. Wpływ aplikacji dolistnej nawozu zawierającego krzem i wapń na plonowanie oraz jakość technologiczną korzeni buraka cukrowego. [Effect of foliar application of a fertilizer containing silicon and calcium on the yield and technological quality of sugar beet roots]. *Progress in Plant Protection* 61 (3): 195–200. DOI: 10.14199/ppp-2021-021
- Artyszak A., Hansen T. 2022. A new alternative source for Si-fertilizer by using ground SiMn-slag. W: *Materiały konferencyjne 8th International Conference on Silicon in Agriculture*. New Orleans, Louisiana, USA, 23–26 maja 2022, 57 ss.
- Bélanger R.R., Benhamou N., Menzies J.G. 2003. Cytological evidence of an active role of silicon in wheat resistance to powdery mildew (*Blumeria graminis* f. sp. *tritici*). *Phytopathology* 93 (4): 402–412. DOI: 10.1094/PHYTO.2003.93.4.402
- Bereś P.K., Siekaniec Ł., Kontowski Ł. 2022. Występowanie chorób kukurydzy (*Zea mays* L.) powodowanych przez grzyby na polach prowadzonych w wieloletniej monokulturze w południowo-wschodniej Polsce w latach 2010–2021. [Influence of fertilizer PRP SOL application in maize on the occurrence of selected diseases and pests]. *Progress in Plant Protection* 62 (2): 117–127. DOI: 10.14199/ppp-2022-014
- Bereś P.K., Strażyński P., Mrówczyński M. (red.) 2023. *Metodyka integrowanej produkcji kukurydzy* (wydanie czwarte zmienione). Główny Inspektorat Ochrony Roślin i Nasiennictwa, Warszawa, Instytut Ochrony Roślin – Państwowy Instytut Badawczy, Poznań, 75 ss. ISBN 978-83-64655-81-4.

- Bijanazadeh E., Barati V., Egan T.P. 2022. Foliar application of sodium silicate mitigates drought stressed leaf structure in corn (*Zea mays* L.). South African Journal of Botany 147: 8–17. DOI: 10.1016/j.sajb.2021.12.032
- Ciecierski W., Korbas M., Horoszkiewicz-Janka J. 2017. Effectiveness of silicon application on mycotoxins reduction in maize. W: Materiały konferencyjne 7th International Conference on Silicon in Agriculture. Bengaluru, Indie, 24–28.10.2017, 96 ss.
- COBORU 2020. Metodyka badania wartości gospodarczej odmian (WGO). Kukurydza. WGO-R/P/7/2020. Centralny Ośrodek Badania Odmian Roślin Uprawnych, Słupia Wielka, 44 ss.
- Coskun D., Deshmukh R., Sonah H., Menzies J.G., Reynolds O., Ma J.F., Kronzucker H.J., Bélanger R.R. 2019. The controversies of silicon's role in plant biology. New Phytologist 221 (1): 67–85. DOI: 10.1111/nph.15343
- Dorneles K.R., Rodrigues F.A., Dallagnol L.J., Pazdiora P.C., Deuner S. 2017. Silicon potentiates biochemical defense responses of wheat against tan spot. Physiological and Molecular Plant Pathology 97: 69–78. DOI: 10.1016/j.pmp.2017.01.001
- Fauteux F., Remus-Borel W., Menzies J.G., Bélanger R.R. 2005. Silicon and plant disease resistance against pathogenic fungi. Microbiology Letters 249 (1): 1–6. DOI: 10.1016/j.femsle.2005.06.034
- Goussain M.M., Moraes J.C., Carvalho J.G., Nogueira N.L., Rossi M.L. 2002. Effect of silicon application on corn plants upon the biological development of the fall armyworm *Spodoptera frugiperda* (J.E. Smith) (Lepidoptera: Noctuidae). Neotropical Entomology 31 (2): 305–310. DOI: 10.1590/S1519-566X2002000200019
- Guével M.H., Menzies J.G., Bélanger E.E. 2007. Effect of root and foliar applications of soluble silicon on powdery mildew control and growth of wheat plants. European Journal of Plant Pathology 119: 429–436. DOI: 10.1007/s10658-007-9181-1
- Hanciaux N. 2019. Effet du silicium sur la préférence alimentaire et le développement de *Spodoptera exigua*. Travail de fin d'études présenté en vue de l'obtention du diplôme de master bioingénieur en sciences et technologies de l'environnement. Liège Université, 80 ss.
- Hansen T.S. 2025. Informacja na temat składu chemicznego nawozu SiGS. <https://rejestrupraw.arimr.gov.pl/> [dostęp: 28.01.2025].
- <https://www.agro.bayer.com.pl/produkty/kukurydza-dekalb/dkc3888> [dostęp: 28.01.2025].
- <https://www.edwin.gov.pl/dane-agrometeorologiczne?station=PME226> [dostęp: 28.01.2025].
- IUSS Working Group WRB 2022. World reference base for soil resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. 4th edition. International Union of Soil Sciences (IUSS), Vienna, Austria, 236 ss.
- Kardasz P., Szulc P., Górecki K., Ambroży-Deręgowska K., Wąsala R. 2024. Silicon as a predictor of sustainable nutrient management in maize cultivation (*Zea mays* L.). Sustainability 16 (23): 10677. DOI: 10.3390/su162310677
- Komisja Europejska 2020. Komunikat Komisji do Parlamentu Europejskiego, Rady, Europejskiego Komitetu Ekonomiczno-Społecznego i Komitetu Regionów. Strategia „od pola do stołu” na rzecz sprawiedliwego, zdrowego i przyjaznego dla środowiska systemu żywnościowego. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PL/TXT/HTML/?uri=CELEX:52020DC0381> [dostęp: 28.01.2025].
- McColloch J.W., Salmon S.C. 1923. The resistance of wheat to the hessian fly – a progress report. Journal of Economic Entomology 16 (3): 293–298.
- Mir R.A., Bhat B.A., Yousuf H., Islam S.T., Raza A., Rizvi M.A., Charagh S., Albaqami M., Sofi P.A., Zargar S.M. 2022. Multidimensional role of silicon to activate resilient plant growth and to mitigate abiotic stress. Frontiers in Plant Science 13: 819658. DOI: 10.3389/fpls.2022.819658
- Moraes S.R.G., Pozza E.A., Pozza A.A.A., Carvalho J.G., Souza P.E. 2009. Nutrição do feijoeiro e intensidade da antracnose em função da aplicação de silício e cobre. [Nutrition in bean plants and anthracnose intensity in function of silicon and copper application]. Acta Scientiarum Agronomy 31 (2): 238–291. DOI: 10.4025/actasciagron.v31i2.7037
- Ning D., Qin A., Liu Z., Duan A., Xiao J., Zhang J., Liu Z., Zhao B., Liu Z. 2020. Silicon-mediated physiological and agronomic responses of maize to drought stress imposed at the vegetative and reproductive stages. Agronomy 10 (8): 1136. DOI: 10.3390/agronomy10081136
- Polanco L.R., Rodrigues F.A., Nascimento K.J.T., Shulman P., Silva L.C., Neves F.W., Vale F.X.R. 2012. Biochemical aspects of bean resistance to anthracnose mediated by silicon. Annales of Applied Biology 161 (2): 140–150. DOI: 10.1111/j.1744-7348.2012.00558.x
- Radkowski A., Radkowska I. 2018. Effects of silicate fertilizer on seed yield in timothy-grass (*Phleum pratense* L.). [Wpływ nawozu krzemowego na plon nasion w uprawie tymotki łąkowej (*Phleum pratense* L.)]. Ecological Chemistry and Engineering S. 25 (1): 169–180. DOI: 10.1515/eces-2018-0012
- Rodgers-Gray B.S., Shaw M.W. 2004. Effects of straw and silicon soil amendments on some foliar and stem-base diseases in pot-grown winter wheat. Plant Pathology 53 (6): 733–740. DOI: 10.1111/j.1365-3059.2004.01102.x
- Rozporządzenie Komisji (UE) 2024/1022 z dnia 8 kwietnia 2024 r. zmieniające rozporządzenie (UE) 2023/915 w odniesieniu do najwyższych dopuszczalnych poziomów deoksynivalenolu w żywności. Dziennik Urzędowy Unii Europejskiej L z 9.4.2024, s. 1 (Dz.U. L 119 z 5.5.2023, s. 103). <http://data.europa.eu/eli/reg/2024/1022/oj> [dostęp: 25.02.2025].
- Soratto R.P., Fernandes A.M., Costa Crusciol C.A., Souza-Schlick G.D. 2012. Yield, tuber quality, and disease incidence on potato crop as affected by silicon leaf application. Pesquisa Agropecuária Brasileira 47 (7): 1000–1006. DOI: 10.1590/S0100-204X2012000700017
- Szymańska G., Sulewska H., Panasiewicz K., Koziara W. 2012. Wpływ stosowania nawozu PRP SOL w kukurydzy na występowanie wybranych chorób i szkodników. [Influence of fertilizer PRP SOL application in maize on the occurrence of selected diseases and pests]. Progress in Plant Protection 52 (2): 314–317. DOI: 10.14199/ppp-2012-057
- Ullah M.S., Mahmood A., Alawadi H.F.N., Seleiman M.F., Khan B.A., Javaid M.M., Wahid A., Abdullah F., Wasonga D.O. 2025. Silicon-mediated modulation of maize growth, metabolic responses, and antioxidant mechanisms under saline conditions. BMC Plant Biology 25: 3. DOI: 10.1186/s12870-024-06013-4
- Ullah M.S., Mahmood A., Ameen M., Nayab A., Ayub A. 2024. Multidimensional role of silicon to mitigate biotic and abiotic stresses in plants: a comprehensive review. Silicon 16: 5471–5500. DOI: 10.1007/s12633-024-03094-6
- Zamojska J., Danielewicz J., Jajor E., Wilk R., Horoszkiewicz-Janka J., Dworzańska D., Węgorok P., Korbas M., Bubniewicz P., Ciecierski W., Narkiewicz-Jodko J. 2018. The influence of foliar application of silicon on insect damage and disease occurrence in field trials. Fresenius Environmental Bulletin 27 (5A): 3300–3305.