

Przesłano: 07-06-2023

Zaakceptowano do druku: 29-08-2023



ROLA KRZEMU WE WZROŚCIE ROŚLIN W ŚWIETLE BADAŃ

Jolanta Kowalska¹, Joanna Krzyminska², Joanna Łukaszyk³

Abstrakt: Artykuł koncentruje się na zasadniczej funkcji krzemu w uprawach roślin i wykorzystywaniu go w praktykach agrotechnicznych, ze szczególnym uwzględnieniem ochrony upraw rolnych. Autorzy analizują wpływ krzemu na rozwój roślin oraz jego potencjał w łagodzeniu stresu suszy dla roślin uprawnych. W pracy przedstawiono wyniki badań prowadzonych w tym obszarze. Omówiono także kwestię naturalnego występowania krzemu oraz efektywne metody jego aplikacji oraz uwzględniono rolę krzemu jako korzystnego czynnika w zwiększaniu odporności i produktywności roślin uprawnych. Stosowanie tej substancji naturalnej w zamiast chemicznych środków produkcji przyczynia się pośrednio do realizacji celu jakim jest zapewnienie gwarancji bezpieczeństwa żywnościowego z zachowaniem zasad zrównoważonego rolnictwa.

Słowa kluczowe: wzrost roślin, plonowanie, zdrowotność roślin, stresy biotyczne, krzem, czynniki abiotyczne

JEL: Q1, Q13

THE ROLE OF SILICON IN PLANT GROWTH IN RESEARCH

Jolanta Kowalska¹, Joanna Krzyminska², Joanna Łukaszyk³

Abstract: The article focuses on the essential function of silicon in agricultural practices, with particular emphasis on the protection of agricultural crops. The authors analyze the effect of silicon on plant development and its potential to mitigate drought stress for crop plants. The results of original research conducted in this area are included. The issue of the natural occurrence of silicon and the effective methods of its application in the context of agriculture were also discussed, as well as the role of silicon as a beneficial factor in increasing the resistance and productivity of crop plants. This contributes to the achieve-

¹ Instytut Ochrony Roślin – Państwowy Instytut Badawczy w Poznaniu (Institute of Plant Protection – National Research Institute in Poznań) | wkład pracy (work input): 34% | ORCID 0000-0002-0588-7355 | e- mail: j.kowalska@iorpib.poznan.pl

² Instytut Ochrony Roślin – Państwowy Instytut Badawczy w Poznaniu (Institute of Plant Protection – National Research Institute in Poznań) | wkład pracy (work input): 33% | ORCID 0000-0002-6257-9850 | e- mail: j.krzyminska@iorpib.poznan.pl

³ Instytut Ochrony Roślin – Państwowy Instytut Badawczy w Poznaniu (Institute of Plant Protection – National Research Institute in Poznań) | wkład pracy (work input): 33% | ORCID 0000-0002-4481-2014 | e-mail: j.lukaszyk@iorpib.poznan.pl

ment of the goal of ensuring food security while maintaining the principles of sustainable agriculture.

Keywords: plant growth, crop yielding, plant health, biotic stresses, silicon, abiotic factors

JEL Classification: Q1, Q13

1. Wstęp

Pierwszym ważnym zastosowaniem krzemu (Si) na gruntach rolnych było użycie żużla (zawierającego znaczny składnik krzemianu wapnia) w uprawie ryżu przez japońskich rolników w latach dwudziestych XX wieku. Stwierdzono, że substancja ta przyczyniła się do wzrostu plonów ziarna oraz zmniejszenia częstości występowania chorób i inwazji szkodników. Te obserwacje skłoniły do dalszych badań nad rolą krzemu w uprawie innych roślin. Znaczna część badań dotyczących krzemu w rolnictwie koncentruje się na jego obecności w glebach, formach rozpuszczalnych krzemu i wynikającej z tego dostępności dla roślin, a także na procesach pobierania i transportu krzemu wewnątrz roślin. Badania wykazały, że krzem ma istotny wpływ na wzrost roślin i może odgrywać ważną rolę w zwiększaniu wydajności upraw oraz wzmocnieniu odporności na różne czynniki stresowe, takie jak susza, zasolenie czy uszkodzenia powodowane przez szkodniki (Tripathi i in., 2021). W ostatnich latach pojawiły się również badania dotyczące stosowania krzemu w rolnictwie ekologicznym. Wiele z nich sugeruje, że krzem może być stosowany jako naturalny środek wspomagający ochronę roślin, co w kontekście ograniczonych możliwości stosowania środków ochrony roślin w rolnictwie ekologicznym nabiera istotności. Omówienie zagadnienia związanego z stosowaniem krzemu jest ważne zarówno dla producentów a przede wszystkim dla doradców. Celem pracy jest przedstawienie wyników dotyczących metod oraz możliwości wykorzystania krzemu w uprawach rolniczych. Szereg badań potwierdza, że w większości krzem korzystnie wpływa na rozwój korzeni roślin uprawnych, zwiększa odporność roślin na porażenie przez patogeny chorobotwórcze i inwazję szkodników poprzez między innymi usztywnienie liści i łodyg oraz wzmaga syntezę barwników asymilacyjnych, co znajduje potwierdzenie w większej wydajności fotosyntezy przekładając się następnie na zwiększenie plonów.

2. Mikro- czy makroelement ?

Krzem należy do grupy pierwiastków niezaliczanych ani do makro-, ani do mikroelementów (Artyszak, 2022). Do makroelementów zalicza się azot (N), fosfor (P), potas (K), wapń (Ca), magnez (Mg) i siarkę (S), natomiast do mikroskładni-

ków bor (B), cynk (Zn), molibden (Mo), miedź (Cu), żelazo (Fe), mangan (Mn), chlor (Cl), a niekiedy także nikiel (Ni) oraz kobalt (Co) dla roślin wiążących azot. Są to składniki konieczne do pełnego wzrostu i rozwoju roślin, pełniące określone funkcje biochemiczne. Nie można ich zastąpić innymi pierwiastkami. Krzem, podobnie jak sód (Na), należy do grupy składników korzystnych, które mają udokumentowane znaczenie dla wybranych gatunków roślin. Przykładowo, sód jest istotny dla buraka cukrowego, podczas gdy krzem pełni ważną rolę dla ryżu (Górski, 2020).

3. Występowanie w naturze

Pomimo dużej zawartości w tkankach roślin (od 0,1 do 10%), krzem nie jest uważany za składnik niezbędny dla roślin. Jest on klasyfikowany jako element korzystny. Odgrywa kluczową rolę w mineralnym odżywianiu roślin, zwłaszcza tych gatunków, które charakteryzują się dużą akumulacją tego pierwiastka (Sienkiewicz-Cholewa, 2021). Zawartość krzemu w skorupie ziemskiej wynosi około 26%, w glebie występuje głównie w postaci krzemionki i różnych typów krzemianów, które są praktycznie nierozpuszczalne w wodzie, co utrudnia jego bezpośrednie pobieranie przez rośliny z podłoża. Absorpcja tego pierwiastka z gleby zwiększa się z wilgotnością podłoża i aktywnością mikroorganizmów glebowych, a w dużej mierze zależy od formy, w której jest dostępny dla rośliny. Krzem występuje w wodzie w bardzo niewielkim stężeniu, ze względu na niską rozpuszczalność związków krzemu. Tylko wody termalne mogą być uważane za bogate w ten składnik, ponieważ stężenie tego pierwiastka może tam dochodzić nawet do 600 mg/l (Palacz, 2020).

Długotrwała intensywna uprawa w połączeniu z użyciem nawozów chemicznych może prowadzić do zmniejszenia dostępnej zawartości krzemu w glebie, co może stanowić rzeczywisty czynnik ograniczający osiągnięcie wysokich plonów, zwłaszcza w przypadku roślin, które akumulują krzem. Gleby tropikalne i subtropikalne charakteryzują się niską zawartością krzemu dostępnego dla roślin. Jest on zatem obecnie uznawany za nieodzowny element w rolnictwie. Stosowanie nawozów krzemowych przyczynia się do poprawy struktury gleby, a wykorzystanie silnie absorpcyjnych krzemianów zwiększa retencję wilgoci w glebie. Poprawiona struktura gleby i jej zdolność do retencji wody, w połączeniu z bardziej rozbudowanym systemem korzeniowym roślin, przekładają się na zwiększenie efektywności nawożenia.

Rośliny pobierają krzem z roztworu glebowego za pomocą mechanizmów zarówno biernych, jak i aktywnych. Badania wykazały, że rośliny jednoliścienne z rodzin Poaceae, Cyperaceae i Commelinaceae są zdolne do akumulacji krzemu,

zawierając od dziesięciu do dwudziestu razy więcej krzemu niż gatunki dwuliścienne (Ma i Takahashi, 2002). Jak podaje Sacała (2009), wiele roślin, zwłaszcza jednoliściennych, zawiera duże ilości Si (do 10% suchej masy). Zboża są roślinami, które kumulują najwięcej krzemu, osiągając około 3% zawartości, podczas gdy rośliny dwuliścienne gromadzą jedynie 0,5% tego pierwiastka. Całkowita zawartość krzemu w roślinie jest zależna od gatunku.

4. Nawożenie a krzem

Praktyki agrotechniczne, takie jak wapnowanie czy intensywne nawożenie azotem i fosforem, mogą ograniczać zdolność roślin do pobierania krzemu. Nawożenie krzemem redukuje toksyczne działanie niektórych pierwiastków, takich jak glin, mangan, żelazo, cynk, kadm, które mogą występować w glebie w nadmiernych stężeniach. Dodatkowo, nawożenie krzemem prowadzi do zwiększenia zawartości wapnia i magnezu w roślinach. Nawożenie krzemem na glebach o niskiej zawartości fosforu powoduje uwalnianie fosforu z form niedostępnych na tych okresowo suchych glebach, co przekłada się na lepsze zaopatrzenie roślin w ten składnik. Wcześniejsze badania wykazały, że pola uprawne, na których rośliny pobierają i gromadzą większe ilości krzemu, charakteryzują się mniejszym współczynnikiem ewapotranspiracji - w przypadku ryżu o około 12–15%, a pszenicy o 10% (Filipczak i in., 2019).

5. Wpływ krzemu na rozwój roślin

Krzem występuje w wielu gatunkach roślin, dla których jest niezbędny do prawidłowego rozwoju. Niemniej jednak, nie udało się jednoznacznie udowodnić, że jest on niezbędny dla rozwoju wszystkich gatunków roślin. W ostatnich latach można zaobserwować wzrost ilości zarówno publikacji naukowych, jak i artykułów popularnonaukowych dotyczących zastosowania krzemu i jego przydatności w produkcji roślinnej. Wykazano w nich, że w sytuacji zwiększonego stresu szansa na uzyskanie pozytywnych efektów związanych ze stosowaniem krzemu jest większa. Krzem wykazuje podobieństwa do roślinnych hormonów stresu, takich jak jasmonian i salicylian produkowanych jako efekt wzbudzenia systemu obronnego rośliny (Epstein, 2009; Kvedaras i in., 2010). Stwierdzono również, że pierwiastek ten zmniejsza podatność roślin na wyleganie (Falkowski i Matysiak, 2015). Zastosowanie krzemu wpływa pozytywnie na wzrost i wigor roślin na kilku płaszczynach: zwiększa tolerancję na stres abiotyczny (promieniowanie UV-B, stres osmotyczny, stres związany z metalami i metalami ciężkimi, stres ekstremalnej temperatury, stres oksydacyjny, stres solny i zasolenie) oraz odporność

na stres biotyczny (Kovaces i in., 2022). Badania pokazują istotną rolę krzemu w odporności roślin na stres wywołany abiotycznymi i biotycznymi czynnikami środowiska (Hou i in., 2006; Sacała, 2009). Przykładowo, w testach z wysoką zawartością metali ciężkich, wykonano badania z doglebową aplikacją krzemu w celu złagodzenia stresu u dwóch odmian pszenicy spowodowanego nadmiarem miedzi w glebie. Dwuletnie badania przeprowadzono w hali wegetacyjnej z wykorzystaniem wazonów o pojemności 2,3 kg gleby. Przed wypełnieniem wazonów glebę zanieczyszczono miedzią w postaci CuSO_4 w dawce 200 mg/kg Cu. Krzem był aplikowany doglebowo przed siewem roślin w dawkach 200 i 400 mg/kg Si w postaci Na_2SiO_3 . Jako roślin testowych użyto dwóch odmian pszenicy – Lindbergh i Kandela. Zastosowana dawka miedzi okazała się toksyczna dla obu badanych odmian pszenicy i spowodowała spadek biomasy pędów, a doglebowa aplikacja krzemu ograniczyła negatywny wpływ miedzi, ale tylko w przypadku odmiany Lindbergh (Zajączkowska i Korzeniowska, 2021).

Krzem jest pierwiastkiem, który korzystnie wpływa na rozwój systemu korzeniowego roślin uprawnych. Zwiększa on odporność roślin na infekcje patogenami oraz inwazję szkodników poprzez utwardzanie liści i łodyg, co jednocześnie stymuluje syntezę barwników asymilacyjnych. Efektem tych procesów jest wzmożona efektywność fotosyntezy, która przekłada się na przyspieszony rozwój i zwiększoną siłę życiową roślin. Dodatkowo, krzem prowadzi do utwardzenia łodyg, co ogranicza wyleganie roślin oraz zwiększa ich odporność na stesy środowiskowe, takie jak susza, niskie i wysokie temperatury. W konsekwencji, obserwuje się zwiększenie plonów. Badania potwierdziły również, że rośliny traktowane dolistnie krzemem efektywniej wykorzystują składniki pokarmowe zawarte w glebie oraz w nawozach (Kieloch i Kulon, 2019).

Rola krzemu w organizmach roślinnych nie ogranicza się jedynie do tworzenia bariery fizycznej lub mechanicznej poprzez amorficzną krzemionkę zawartą w ścianach komórkowych, świątłach i pustkach międzykomórkowych. Krzem wykazuje zdolność do modulowania metabolizmu roślin oraz do modyfikacji ich aktywności fizjologicznej, szczególnie w warunkach stresowych. Warto jednak zauważyć, że korzystny wpływ zwiększonej aplikacji krzemu na wzrost nie jest obserwowany we wszystkich gatunkach roślin. W związku z tym, lepsze zrozumienie interakcji między zastosowaniem krzemu a odpowiedziami roślin jest kluczowe do bardziej efektywnego wykorzystania tego pierwiastka, zwłaszcza w warunkach stresowych (Kowalska i in., 2020).

W celu złagodzenia negatywnych skutków stresu u roślin, krzem może być aplikowany bezpośrednio do strefy korzeniowej lub dolistnie. Obecność krzemu w tkankach roślinnych lub na ich powierzchni dostarcza istotnego wsparcia strukturalnego dla organizmu roślinnego, jak również negatywnie wpływa na warunki

dla rozwijających się patogenów poprzez eliminację wody. Krzem zwiększa również tolerancję roślin na suszę oraz na obecność metali ciężkich (Epstein, 2009; Haynes, 2014; Tubana i in., 2016). Istotne jest, że nadmierna aplikacja krzemu nie ma negatywnego wpływu na rośliny ani nie prowadzi do ich zanieczyszczenia. Co więcej, stosowanie krzemu nie powoduje korozji sprzętu rolniczego, co ma kluczowe znaczenie z punktu widzenia praktyki rolniczej (Etesami i Jeong, 2018).

Autorzy publikacji przeprowadzili badania nad wykorzystaniem krzemu jako zaprawy ziarna, stanowiącej alternatywę dla aplikacji doglebowej. W eksperymencie porównano efektywność dwóch produktów – ZumSil i AdeSil – z biopreparatem Panoramix zboże oraz z tradycyjną zaprawą chemiczną. Mimo początkowego negatywnego wpływu na energię kiełkowania, zdolność do kiełkowania nie zmniejszyła się. Rośliny pochodzące z ziarna zaprawianego preparatami ZumSil i AdeSil wykazywały znacznie większy wzrost. Stosowanie preparatów Panoramix, ZumSil oraz AdeSil do zaprawiania ziarna pszenicy jarej skutecznie chroniło podstawę źdźbła rośliny przed porażeniem przez *Fusarium graminearum*, osiągając poziom ochrony porównywalny z zaprawą chemiczną (Krzymińska, 2021). Inne badania skupiały się na możliwości łagodzenia stresu suszy w pszenicy jarej poprzez zastosowanie aplikacji krzemu, zarówno dolistnej, jak i doglebowej. Te działania były monitorowane w trakcie dwuletniego cyklu badawczego, realizowanego w hali wegetacyjnej, gdzie pszenicę uprawiano w wazonach o pojemności 10 kg gleby. Krzem był aplikowany dolistnie w stężeniu 6 mM Si/l oraz doglebowo przed siewem roślin w dawkach 200 i 400 mg Si/kg, w formie Na_2SiO_3 (Sienkiewicz-Cholewa, 2021).

Zastosowanie krzemu w warunkach polowych badano w latach 2017-2018, zastosowano trzy metody (doglebową, dolistną, łączoną) stosowania dwóch form krzemu w uprawie pszenicy. Zastosowano formę granulowaną krzemu w dawce 10 kg/ha (AdeSil, 92% SiO_2 , 43% Si) oraz formę płynną (ZumSil, 30% H_4SiO_4 , 8,81% Si) w dawce 0,3 l/ha. W badaniach polowych wykorzystano pszenicę jarą, odmianę Arabella. W trakcie okresu wegetacji dokonano oceny liczby wschodów, wysokości roślin oraz obsady kłosów. Wykazano, że liczba wschodów, wysokość roślin oraz obsada kłosów na metr kwadratowy były największe po zastosowaniu płynnej formy krzemu - ZumSil, niezależnie od metody aplikacji. Obserwacje te potwierdziły istotny wpływ krzemu na rośliny (Kowalska i in., 2018).

Kolejne badania polowe potwierdziły wpływ krzemu na wzrost roślin uprawnych w różnych warunkach wilgotnościowych. W polowych doświadczeniach, krzem został zastosowany do zaprawiania nasion oraz/lub do opryskiwania liści pszenicy. W pierwszym przypadku, użyto sproszkowanego krzemu w dawce 0,5 kg/100 kg ziarna w połączeniu z formą płynną w dawce 0,5 l/100 kg ziarna. W drugim przypadku, wykorzystano formę płynną krzemu w dawce 0,5 l na 200 l wody na

hektar, a opryskiwanie wykonano w późnej fazie krzewienia, strzelania w źdźbło oraz w fazie liścia flagowego. Aplikacja krzemu miała pozytywny wpływ na plonowanie pszenicy, ale zależało to od metody aplikacji, odmiany pszenicy oraz nasilenia stresu wodnego. Odmiana Harenda była bardziej wrażliwa na niski poziom wilgotności gleby niż odmiany Rusałka i Serenada. W warunkach niedoboru wody, zastosowanie krzemu spowalniało wzrost młodych roślin pszenicy odmiany Harenda, ale ostatecznie ta odmiana zwiększyła plon ziarna w większym stopniu niż dwie pozostałe. Najniższą masę tysiąca ziaren zaobserwowano dla odmiany Harenda; jednakże aplikacja krzemu poprawiła ten parametr. Krzem zwiększył plony trzech odmian pszenicy, a najwyższy plon zebrano z poletek, na których zastosowano połączone metody aplikacji krzemu. Plony odmian Rusałka i Serenada na tych obszarach były od 14 do 28% wyższe w porównaniu z grupą kontrolną. Odmianą o najniższym plonie była Harenda, ale właśnie ta odmiana, bardziej niż dwie pozostałe, zwiększała plonowanie dzięki zastosowaniu krzemu. Ta odmiana zwiększyła plony w 2018 roku (rok o średnich opadach) o 26% z 2,92 do 3,94 t/ha, a w 2019 (rok suszy) o 42% z 1,66 do 2,87 t/ha. Można zatem stwierdzić, że krzem poprawia plonowanie pszenicy, a jego efektywność zależy od skali stresu wodnego, sposobu aplikacji oraz odmiany. Najprostszą i najbardziej elastyczną metodą aplikacji krzemu jest zaprawianie nasion, co ma perspektywy szerszego zastosowania, zwłaszcza w rolnictwie ekologicznym (Kowalska i in., 2021).

6. Wpływ na plonowanie i zdrowotność roślin

Zdrowotność roślin jest jednym z kluczowych czynników wpływających na wielkość uzyskanego plonu. Infekcje roślin przez patogenne grzyby prowadzą do strat w plonach, które mogą się różnić w zależności od odmiany, warunków pogodowych i technologii uprawy. Zastosowanie rozpuszczalnej formy krzemu może pomóc zmniejszyć intensywność symptomów chorób roślin (Segalin i in., 2013). Zgodnie z badaniami przeprowadzonymi przez Griffina i in. (2015), krzem może ograniczać żerowanie ślimaków na sadzonkach pszenicy. Obecnie, najważniejszą rolą krzemu jest łagodzenie skutków deficytu wody w roślinach. Różne formy krzemu i ich związki wpływają na efekt przeprowadzanej aplikacji. Krzem stymuluje wzrost pszenicy, zwiększając liczbę kłosów i wysokość roślin. Uprawy ekologiczne pszenicy jarej z użyciem płynnego roztworu kwasu monokrzemowego dają wyższe plony w porównaniu do preparatu w formie proszku - ziemi okrzemkowej. Aplikacja krzemu zarówno doglebowa, jak i dolistna, jest bardziej efektywna niż pojedyncza aplikacja doglebowa lub dolistna (Kowalska i in., 2021).

Udowodniono korzystny wpływ dolistnej aplikacji krzemu na wielkość plonów, m.in. w uprawie buraka cukrowego, roślin bobowatych, mieszanek traw

z roślinami bobowatymi, jęczmienia, pszenicy, rzepaku, soi oraz ziemniaka (Artyszak i Popielec, 2022). W dwuletnich badaniach z ziemniakiem, zastosowano krzemian o składzie: $\text{Si}(\text{OH})_4$ 2,5%, Cu 1,0%, Zn 0,6%, B 0,3% i Mo 0,2%. Zabiegi przeprowadzono na roślinach o wysokości 20 cm (faza BBCH 19), w okresie zwierania międzyrzędzi (faza BBCH 39) i po kwitnieniu (faza BBCH 70), jedno-, dwu- i trzykrotnie w okresie wegetacji. Nawożenie organiczne stanowiła słoma i międzyplon gorczycy białej. Nawożenie mineralne stosowano w dawkach: 100 kg/ha N, 60 kg/ha P_2O_5 i 120 kg/ha K_2O . Niezależnie od roku badań i liczby zabiegów, zaobserwowano istotny wzrost plonu, o 12,9% w porównaniu z kontrolą. Największy wzrost plonu zanotowano w roku suchym (2018), po zastosowaniu krzemianu w fazie zwierania międzyrzędzi i po kwitnieniu. Stwierdzono tendencję do wzrostu udziału dużych bulw, o średnicy ponad 60 mm, w plonie oraz zmniejszania się udziału bulw zdeformowanych po zastosowaniu krzemianu. Wykazano korzystny wpływ preparatu na zawartość skrobi i witaminy C w bulwach (Trawczyński, 2019).

Według niektórych doniesień, wpływ krzemu na wielkość plonu korzeni i cukru technologicznego różnił się w zależności od lokalizacji, roku badań oraz warunków środowiskowych. Analiza wyników z trzech lat badań nie wykazała istotnego wpływu zastosowanego krzemu na plon i jakość korzeni oraz cukru technologicznego w porównaniu do kontroli (Górski i in., 2017).

W Instytucie Uprawy, Nawożenia i Gleboznawstwa – Państwowy Instytut Badawczy (IUNG-PIB) testowano krzem na pszenicy jarej (odm. Serenade i Gratka) w warunkach polowych. Potwierdzono pozytywny wpływ krzemu na plony, notowano wzrost plonów o 27% w porównaniu do kontroli. Wzrost był obserwowany po zastosowaniu kompleksowej technologii krzemowo-mikrobiologicznej, która obejmowała użycie preparatów AdeSil oraz ZumSil i Fungizum (szczep bakterii *Paenibacillus polymyxa* DCF B/00052) do zaprawiania ziarna, oraz wykonanie dwóch zabiegów dolistnych preparatami Zumsil oraz Fungizum (zebrano plon 5,02 t/ha). Zauważono także znaczny wzrost plonu (4,81 t/ha; 23% w stosunku do kontroli) po zaprawianiu ziarna preparatami Adesil i ZumSil oraz po wykonaniu dwóch zabiegów dolistnych preparatem ZumSil. Zastosowanie kompleksowej technologii stymulowało rozkrzewienie pszenicy jarej, wpływało pozytywnie na masę tysiąca ziaren, a także zwiększało obsadę kłosów w łanie odmiany Gratka. Pszenica jara traktowana zaprawą krzemową i zabiegami dolistnymi z krzemem organicznym charakteryzowała się największą długością i masą kłosa, co przełożyło się na wyższe plonowanie pszenicy jarej było związane z mniejszym porażeniem liści przez patogeny grzybowe, szczególnie w przypadku następujących kombinacji: 1) zaprawianie ziarna preparatami Adesil + ZumSil, 2) zaprawianie ziarna Adesil + ZumSil + 2 zabiegi dolistne ZumSil, 3) zaprawianie

Fungizum + Adesil i ZumSil + 2 zabiegi dolistne Fungizum + ZumSil. Uzyskano najniższe plony oraz obserwowano najwięcej objawów chorób liści pszenicy w warunkach kontrolnych, gdzie nie stosowano preparatów biologicznych (Feledyn-Szewczyk, 2022).

7. Metoda aplikacji i forma produktu

Krzem dostępny na rynku może występować w różnych formach, które wpływają na jego efektywność. Można znaleźć go w formie stabilizowanego kwasu ortokrzemowego, krzemianów potasu, sodu i wapnia oraz nanokrzemionki. Kwas ortokrzemowy jest formą krzemu, którą rośliny pobierają, ale jeżeli jest stabilizowany za pomocą związków organicznych, na przykład choline, może łatwo przejść w formę niedostępną dla roślin. Formą przyswajalną dla roślin, rozpuszczalną w roztworze glebowym, jest kwas ortokrzemowy (H_4SiO_4), którego stężenie w roztworze glebowym wynosi od 1 do 200 mg/dm³ (Kabata-Pendias i Pendias, 1999; Pilon-Smits i in., 2009). Pobieranie krzemu przez rośliny jest utrudnione ze względu na duże molekuly krzemianów glebowych. Dlatego produkty zazwyczaj zawierają obok krzemu w formie kwasu ortokrzemowego, również cholinę (w ilości rzędu 45-65%) oraz wapń (około 2%). Wapń wspomaga reakcje enzymatyczne i jako składnik blaszki środkowej wzmacnia ściany komórkowe. Cholina, będąca podstawowym składnikiem membran komórkowych, służy jako przewodnik krzemu w roślinie. Dzięki stabilizacji choliną, cząsteczki ortokrzemianów są jak najmniejsze, co przyspiesza ich absorpcję nawet dwadzieścia razy (Szulc i Konieczny, 2015). Informacja o pH produktu jest również cenną wskazówką dotyczącą formy krzemu. Kwaśny odczyn sugeruje obecność kwasu ortokrzemowego, natomiast zasadowe pH wskazuje na obecność krzemianów potasu, wapnia lub sodu stabilizowanych chelatami żelaza i działających na powierzchni rośliny.

8. Podsumowanie

Krzem można stosować wielokierunkowo, jednak najczęściej stosowaną metodą jest aplikacja dolistna, polegająca na dwu lub trzykrotnym opryskiwaniu roślin w trakcie wegetacji, rozpoczynając zabiegi we wczesnych fazach rozwojowych roślin – na początku krzewienia w przypadku zbóż i na 3 do 4 liści w uprawie buraka (Artyszak, 2022). W przypadku buraka cukrowego, zaleca się stosowanie krzemu od fazy 6 do 8 liści do fazy zakrycia międzyrzędzi. Należy ponownie podkreślić, że im większy jest czynnik stresu – np. susza – tym bardziej widoczne są efekty łagodzenia stresu. Krzem nie przyczynia się do wzrostu plonowania, ale ogranicza straty. Coraz częściej podkreśla się pozytywny wpływ aplikacji krzemu w kukury-

dzy, gdzie zaleca się wykonanie od 2 do 3 zabiegów dolistnych w fazie od 2 do 8 liścia. Przeprowadza się kolejne doświadczenia z krzemem w uprawach takich jak ziemniak, łubin biały, gryka, groch siewny oraz na użytkach zielonych. Potencjał plonotwórczy krzemu zależy od wielu czynników, takich jak forma (na rynku dostępnych jest obecnie 15 produktów zawierających różne formy krzemu) i metoda jego stosowania, gatunek i odmiana rośliny, dawka, stężenie krzemu w roztworze do dolistnej aplikacji, ilość i terminy zabiegów, rodzaj gleby i jej pH oraz stopień występującego stresu (Sienkiewicz-Cholewa, 2022).

LITERATURA

1. Artyszak, A. (2022). Silicon foliar application in sugar beet production. W: Misra, V., Srivastava, S., Mall, A.K. (red.), Sugar Beet Cultivation, Management and Processing, 315-325. Springer, Singapore.
2. Artyszak, A., Popielec, R. (2022). Ocena rynkowa stosowania dolistnego produktów z krzemem. *Zagadnienia Doradztwa Rolniczego*, 109(3), 22-32. ISSN 1232-3578.
3. Epstein, E. (2009). Silicon: its manifold roles in plants. *Annals of Applied Biology*, 155(2), 155-160. DOI: 10.1111/j.1744-7348.2009.00343.x.
4. Etesami, H., Jeong, B.R. (2018). Silicon (Si): Review and future prospects on the action mechanisms in alleviating biotic and abiotic stresses in plants. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 147, 881-896. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2017.09.063.
5. Falkowski, J., Matysiak, R. (2008). Kukurydza. W: Waligóra, H. (red.), Pismo Polskiego Związku Producentów Kukurydzy w Poznaniu, 4-56. Drukarnia ProDRUK Poznań.
6. Feledyn-Szewczyk, B. (2022). Sprawozdanie 2. Pobrane z: https://www.iung.pl/wp-content/uploads/2022/11/Sprawozdanie_2_IUNG-PIB_Feledyn-Szewczyk.pdf (19.05.2023).
7. Filipczak, J., Sas-Paszt, L., Sitarek, M. (2019). Wpływ preparatów krzemowych na wzrost i plonowanie roślin truskawki. *Zeszyty Naukowe Instytutu Ogrodnictwa*, 27, 17-24. YADDA: bwmeta1.element.agro-4e479e33-ec13-4abe-b53c-19de246da927
8. Górski, D. (2020). Efektywność stosowania krzemu w uprawie buraka cukrowego. *Poradnik Plantatora Buraka Cukrowego*, 3, 38-40.
9. Górski, D., Ulatowska, A., Piszczek, J., Gaj, R. (2017). Wpływ dolistnego nawożenia krzemem i wapniem na plon i jakość technologiczną buraka cukrowego. *Fragmenta Agronomica*, 34(4), 46-58.
10. Griffin, M., Hogan, B., Schmidt, O. (2015). Silicon reduces slug feeding on wheat seedlings. *Journal of Pest Science*, 88(1), 17-24. DOI: 10.1007/s10340-014-0579-1.
11. Haynes, R. A. (2014). Contemporary overview of silicon availability in agricultural soils. *Journal of Soil Science*, 177, 831-844. DOI: 10.1002/jpln.201400202.
12. Hou, L., Szwonek, E., Xing, S. (2006). Advances in silicon research of horticultural crops. *Vegetable Crops Research Bulletin*, 64, 5-17.
13. Kabata-Pendias, A., Pendias, H. (1999). *Biogeochemia pierwiastków śladowych*. PWN, Warszawa.

14. Kieloch, R., Kulon, T. (2019). Wpływ intensywności uprawy na zdrowotność roślin oraz zmienność plonowania odmian pszenicy ozimej. *Progress in Plant Protection*, 59, 149-155. DOI: 10.14199/ppp-2019-020.
15. Kovaces S., Kutasy E., Csajbok J. (2022). The Multiple Role of Silicon Nutrition in Alleviating Environmental Stresses in Sustainable Crop Production. *Plants*, 11(9), 1223. DOI: 10.3390/plants11091223.
16. Kowalska, J., Jakubowska, M., Nowaczyk, R. (2018). The effect of silicon application on growth of spring wheat under organic farming. *Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering*, 63(3), 20-23.
17. Kowalska, J., Tyburski, J., Bocianowski, J., Krzywińska, J., Matysiak, K. (2020). Methods of Silicon Application on Organic Spring Wheat (*Triticum aestivum* L. spp. *vulgare*) Cultivars Grown across Two Contrasting Precipitation Years. *Agronomy*, 10, 1655. DOI: 10.3390/agronomy10111655.
18. Kowalska, J., Tyburski, J., Jakubowska, M., et al. (2021). Effect of Different Forms of Silicon on Growth of Spring Wheat Cultivated in Organic Farming System. *Silicon*, 13, 211-217. DOI: 10.1007/s12633-020-00414-4.
19. Krzywińska, J. (2021). Ocena przydatności mikroorganizmów i krzemu do zaprawiania ziarna pszenicy z przeznaczeniem dla rolnictwa ekologicznego. *Progress in Plant Protection*, 61(1), 62-67. DOI: 10.14199/ppp-2021-007.
20. Kvedaras, O.L., An, M., Choi, Y.S., Gurr, G.M. (2010). Silicon enhances natural enemy attraction and biological control through induced plant defences. *Bulletin of Entomological Research*, 100(3), 367-371. DOI: 10.1017/S0007485309990265.
21. Ma, J.F., Takahashi, E. (2002). *Soil, Fertilizer, and Silicon Research in Japan*. Elsevier, Amsterdam.
22. Palacz, M. (2020). Zastosowanie spektrometrii fluorescencyjnej rentgenowskiej całkowitego odbicia (TXRF) do oznaczania zawartości krzemu w materiale roślinnym. *ŻYWNOŚĆ. Nauka. Technologia. Jakość*, 27(4), 90-102. DOI: 10.15193/zntj/2020/125/361.
23. Pilon-Smits, E. A., Quinn, C. F., Tapken, W., Malagoli, M., & Schiavon, M. (2009). Physiological functions of beneficial elements. *Current opinion in plant biology*, 12(3), 267-274. DOI: 10.1016/j.pbi.2009.04.009.
24. Sacała, E. (2009). Role of silicon in plant resistance to water stress. *Journal of Elementology*, 14, 619-630. DOI: 10.5601/jelem.2009.14.3.20.
25. Segalin, S.R., Huth, C., Rosa, T., Pahins, D., Mertz-Henning, L., Nunes, U., Martin, T. (2013). Foliar application of silicon and the effect on wheat seed yield and quality. *Journal of Seed Science*, 35(1), 86-91. DOI: 10.1590/S2317-15372013000100012.
26. Sienkiewicz-Cholewa, U. (2021). Reakcja pszenicy jarej rosnącej na glebie zanieczyszczonej miedzią na doglebowe nawożenie krzemem. *Progress in Plant Protection*, 61(3), 207-213. DOI 10.14199/ppp-2021-004.
27. Sienkiewicz-Cholewa U. (2022). Krzem dolistnie czy doglebowo? Pobrane z: <https://nawozy.eu/wiedza/porady-ekspertow/rosliny/krzem-dolistnie-czy-doglebowo> (30.05.2023).
28. Szulc P., Konieczny M. (2015). Wpływ Actisilu na przyrost biomasy roślin i plon nasion Kukurydzy. *Kukurydza* 2(47), 34-38.

29. Trawczyński, C. (2019). Wpływ dolistnego preparatu krzemowego na plon i jakość bulw ziemniaka. *Ziemniak Polski*, 2019 (2), 11-17.
30. Triphati, P., et al. (2021). Silicon Effects on the Root System of Diverse Crop Species Using Root Phenotyping Technology. *Plants*, 10(5), 885. DOI: 10.3390/plants10050885.
31. Tubana, B.S., Babu, T., Datnoff, L.E.A. (2016). Review of Silicon in Soils and Plants and Its Role in US Agriculture History and Future Perspectives. *Soil Science*, 181, 393-411. DOI: 10.1097/SS.000000000000179.
32. Zajączkowska, A., Korzeniowska, J. (2021). Reakcja pszenicy rosnącej na glebie zanieczyszczonej miedzią na doglebowe nawożenie krzemem. *Progress in Plant Protection*, 61(1), 31-39. DOI 10.14199/ppp-2021-004.