

Received: 27.05.2026 / Accepted: 12.06.2026

ARTYKUŁ PRZEGLĄDOWY

Preparaty krzemowe w rolnictwie – formy chemiczne, biodostępność i problemy porównywalności na rynku polskim

Silicon preparations in agriculture – chemical forms, bioavailability, and comparability issues on the Polish market

Aleksandra Zajączkowska* 

Streszczenie

Efektywność agrotechniczna preparatów krzemowych jest determinowana przez biodostępność i stabilność formy chemicznej pierwiastka, a nie jego całkowitą zawartość w produkcie. Celem pracy była ocena zależności między formą strukturalną krzemu, a jego asymilacją przez rośliny, a także analiza porównawcza produktów dostępnych na polskim rynku rolniczym. W artykule scharakteryzowano właściwości fizykochemiczne krzemianów, monomerycznego kwasu ortokrzemowego (H_4SiO_4) oraz nanokrzemionki (SiO_2), różnicując je pod kątem mobilności w środowisku glebowym oraz mechanizmów transportu i odkładania w tkankach roślinnych. Przeprowadzona analiza rynku ujawniła brak jednolitych standardów w deklarowaniu składu chemicznego. Istotnym problemem ograniczającym bezpośrednią porównywalność produktów jest równoległe stosowanie jednostek przeliczeniowych pierwiastka (Si i SiO_2) oraz niejednolity sposób informowania o rzeczywistej formie aktywnej krzemu. Uzyskane wyniki wskazują na potrzebę wypracowania spójnych standardów raportowania składu i metod oceny jakościowej, co pozwoli na bardziej przewidywalne i racjonalne wykorzystanie preparatów krzemowych w praktyce rolniczej.

Słowa kluczowe: krzem, biodostępność, preparaty rolnicze, forma chemiczna, SiO_2 , rynek polski

Abstract

The agricultural effectiveness of silicon formulations is determined by the bioavailability and stability of the element's chemical form rather than its total content in the product. The aim of this study was to evaluate the relationship between the structural form of silicon and its assimilation by plants, alongside a comparative analysis of products available on the Polish agricultural market. The article characterizes the physicochemical properties of silicates, monomeric orthosilicic acid (H_4SiO_4), and nanosilica (SiO_2), differentiating them in terms of mobility in the soil environment as well as transport and deposition mechanisms in plant tissues. The market analysis revealed a high degree of a lack of uniform standards for declaring chemical composition. A significant issue limiting the direct comparability of products is the parallel use of conversion units for the element (Si and SiO_2) and inconsistent reporting on the actual active form of silicon. The results indicate a need to develop consistent standards for composition reporting and qualitative assessment methods, which will allow for more predictable and rational use of silicon products in agricultural practice.

Keywords: silicon, bioavailability, agricultural products, chemical form, SiO_2 , Polish market

Instytut Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa – Państwowy Instytut Badawczy
Zakład Herbologii i Techniki Uprawy Roli
ul. Orzechowa 61, 50-540 Wrocław

* corresponding author: a.zajaczkowska@iung.wroclaw.pl

Wstęp / Introduction

Biodostępność krzemu w systemie gleba–roślina / Bioavailability of silicon in the soil–plant system

Postępujące zmiany klimatyczne oraz intensyfikacja produkcji rolniczej prowadzą do zwiększenia częstości i skali występowania stresów abiotycznych, które w coraz większym stopniu determinują stabilność plonowania (Abberton i wsp. 2016; George i wsp. 2017; Chaudhry i Sidhu 2022; Wadas i Kondraciuk 2025). W przeciwieństwie do klasycznych ograniczeń produkcyjnych, takich jak niedobory składników pokarmowych, czynniki stresowe – w szczególności deficyt wody, zasolenie oraz ekstremalne temperatury – oddziałują wielopoziomowo, zakłócając procesy fizjologiczne oraz integralność struktur komórkowych. W rezultacie prowadzi to nie tylko do obniżenia produktywności roślin, lecz także do zwiększenia zmienności plonów, co stanowi kluczowe wyzwanie dla współczesnego rolnictwa (Beacham i wsp. 2018; Oshunsanya i wsp. 2019; Bazakos i wsp. 2026). W tym kontekście rośnie znaczenie pierwiastków o charakterze quasi-niezbędnym, które – choć nie uczestniczą bezpośrednio w podstawowych szlakach metabolicznych – odgrywają znaczącą rolę w modulowaniu odpowiedzi roślin na stres środowiskowy (Kaur i wsp. 2016; Awasthi i wsp. 2022; Mukarram i wsp. 2025). Krzem stanowi jeden z najlepiej udokumentowanych przykładów takiego działania. Jego rola wykracza poza funkcję strukturalną i obejmuje interakcje na poziomie fizycznym, fizjologicznym oraz biochemicznym (Zargar i wsp. 2019; Mandlik i wsp. 2020; Ahire i wsp. 2021; Thakral i wsp. 2021). Odkładanie krzemu w postaci uwodnionej krzemionki wzmacnia ściany komórkowe i ogranicza straty wody, natomiast jego obecność w tkankach wiąże się z poprawą stabilności błon, efektywności wykorzystania wody oraz aktywności systemów antyoksydacyjnych (Chen i wsp. 2018; Brahma i wsp. 2020; Pavlovic i wsp. 2021). Efekty te są jednak ściśle uzależnione od formy chemicznej krzemu oraz jego dostępności dla roślin. Pomimo wysokiej zawartości całkowitej w glebie, jedynie niewielka część występuje w formach mobilnych, zdolnych do pobrania. Krzem funkcjonuje w układzie gleba–roślina w dynamicznej równowadze pomiędzy frakcjami nierozpuszczalnymi, koloidalnymi i rozpuszczalnymi (czyli formami mobilnymi, łatwo dostępnymi dla roślin), a jego dostępność podlega szybkim zmianom w wyniku procesów, takich jak polimeryzacja, adsorpcja czy interakcje z jonami obecnymi w roztworze glebowym (Tubaña i Heckman 2015; Neeru i wsp. 2019; Schaller i wsp. 2021). W konsekwencji biodostępność krzemu należy traktować jako parametr dynamiczny, zależny zarówno od warunków środowiskowych, jak i właściwości zastosowanej formulacji (Exley 2015; Tubaña i Heckman 2015; López-Pérez i wsp. 2018; Schaller i wsp. 2021). Ma to szczególne znaczenie w kontekście praktyki rolniczej, gdzie różne formy krzemu wykazują odmienną skuteczność

działania, wynikającą z ich właściwości fizykochemicznych oraz zdolności do przemieszczania się w środowisku glebowym i tkankach roślinnych.

Celem niniejszej pracy była ocena zależności między formą chemiczną krzemu, a jego biodostępnością dla roślin, a także analiza porównawcza wybranych preparatów krzemowych dostępnych na polskim rynku rolniczym pod kątem przejrzystości deklarowania ich składu.

Charakterystyka form chemicznych krzemu / Characterization of silicon chemical forms

Krzem stosowany w rolnictwie występuje w różnych formach chemicznych, które istotnie różnią się pod względem rozpuszczalności, mobilności oraz mechanizmów działania. Różnice te przekładają się bezpośrednio na ich efektywność agronomiczną, zarówno w aplikacji doglebowej, jak i dolistnej. W środowisku glebowym dominują formy stałe, takie jak krzemiany pierwotne i wtórne oraz krzemionka, które charakteryzują się niską rozpuszczalnością i ograniczoną mobilnością. Z tego względu w praktyce rolniczej stosuje się różne grupy preparatów krzemowych, różniące się stopniem przetworzenia oraz właściwościami użytkowymi. Do najwcześniej stosowanych należą krzemiany, które stanowią tzw. pierwszą generację preparatów krzemowych. W praktyce rolniczej wykorzystywane są przede wszystkim krzemiany potasu, sodu i wapnia, charakteryzujące się wysoką rozpuszczalnością w wodzie oraz silnie zasadowym odczynem (pH często wyższym od 10) (Laane 2018; Ahire i wsp. 2021; Shivaraj i wsp. 2022). W warunkach wysokiego pH zwiększa się ich rozpuszczalność, jednak jednocześnie sprzyja to przemianom prowadzącym do ograniczenia trwałości form mobilnych. Dodatkowo środowisko alkaliczne może powodować uszkodzenia tkanek roślinnych, co wymaga ostrożności w stosowaniu, szczególnie w aplikacji dolistnej (Tubaña i Heckman 2015; Trejo-Téllez i wsp. 2020; Thakral i wsp. 2021; Kumar i wsp. 2025). Skuteczność dolistnego stosowania krzemianów jest ograniczona również przez właściwości kutykuli, która stanowi barierę dla transportu form hydrofilowych. W rezultacie znaczna część aplikowanego krzemu pozostaje na powierzchni liścia, pełniąc głównie funkcję ochronną (Song i wsp. 2021; Kohay i wsp. 2025; Velasco i wsp. 2026).

Ograniczenia krzemianów w zakresie biodostępności i efektywności aplikacji dolistnej, zestawione z właściwościami innych form krzemu (tab. 1), stanowiły podstawę do rozwoju bardziej zaawansowanych formulacji opartych na formach monomerycznych, przede wszystkim kwasie ortokrzemowym (H_4SiO_4), uznawanym za podstawową, fizjologicznie aktywną formę krzemu w roztworze glebowym (Tubaña i Heckman 2015; Ruan i wsp. 2026). W przeciwieństwie do krzemianów, kwas ortokrzemowy występuje jako obojętna, niezdysocjowana cząsteczka o niewielkich rozmiarach ($\text{pK}_a \approx 9,25$), co w typowych warunkach glebowych (pH niższym, mieszczącym się w za-

kresie 8–9) determinuje jego wysoką mobilność oraz zdolność do przenikania przez bariery biologiczne (Exley i wsp. 2019; van den Berg i wsp. 2021). W tych warunkach H_4SiO_4 stanowi dominującą formę krzemu w roztworze glebowym i występuje głównie w postaci monomerycznej, o stężeniach zależnych od właściwości gleby, najczęściej mieszczących się w zakresie od ułamków do kilkudziesięciu mg/l (Tubaña i Heckman 2015). Pomimo dominacji tej formy w roztworze glebowym, jej dostępność pozostaje silnie uzależniona od warunków środowiskowych. Wraz ze wzrostem pH powyżej wartości około 9 dochodzi do stopniowej dysocjacji kwasu ortokrzemowego oraz jego kondensacji, prowadzącej do powstawania form oligomerycznych i koloidalnej krzemionki, szczególnie w warunkach alkalicznych. Proces ten nasila się przy wysokich stężeniach krzemu, choć powstałe oligomery charakteryzują się ograniczoną trwałością i w warunkach naturalnych ulegają ponownej depolimeryzacji do formy monomerycznej (Tubaña i Heckman 2015; Liu i wsp. 2019). Równocześnie odczyn gleby reguluje procesy adsorpcji i desorpcji H_4SiO_4 – maksymalna retencja obserwowana jest w zakresie wartości pH 9–10, natomiast w glebach kwaśnych i silnie zasadowych jego mobilność wzrasta. Istotny wpływ wywierają również skład mineralny gleby, obecność tlenków Fe i Al, materia organiczna oraz zabiegi agrotechniczne, takie jak nawożenie czy wapnowanie (Schaller i wsp. 2021). Kluczową cechą H_4SiO_4 jest jego relatywnie wysoka biodostępność w porównaniu do innych form krzemu (Guo i wsp. 2026). Niewielki rozmiar cząsteczek oraz brak ładunku sprzyjają jej dyfuzji w środowisku wodnym oraz przenikaniu przez błony biologiczne w mechanizmie dyfuzji ułatwionej, z udziałem akwaporyn z podrodziny NIP (Nodulin 26-like Intrinsic Proteins), określanych również jako kanały metaloidowe. Szczególną rolę odgrywają białka z grupy NIP-III, charakteryzujące się szerokim filtrem selektywności, umożliwiającym transport kwasu ortokrzemowego (Pommerrenig i wsp. 2020; Yan i wsp. 2022). W tkankach korzeniowych transport krzemu ma charakter kierunkowy i jest kontrolowany przez współdziałanie transporterów błonowych, takich jak Lsi1 (OsNIP2;1), odpowiedzialny za napływ H_4SiO_4 do komórek oraz Lsi2 uczestniczący w jego dalszym transporcie do ksylemu (Ma i Yamaji 2008; Ma 2010; Yamaji i Ma 2021). Układ ten umożliwia efektywne przemieszczanie krzemu do organów nadziemnych, gdzie ulega on spontanicznej polimeryzacji i odkładaniu w postaci uwodnionej krzemionki ($\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$), głównie w ścianach komórkowych (Liang i wsp. 2015; Nawaz i wsp. 2019). Proces ten zwiększa stabilność mechaniczną tkanek oraz odporność roślin na stesy biotyczne i abiotyczne. Z punktu widzenia aplikacji dolistnej kwas ortokrzemowy wykazuje istotną przewagę nad krzemianami, wynikającą z jego zdolności do efektywnego wnikiwania do wnętrza liścia oraz uczestnictwa w procesach fizjologicznych. Przekłada się to na wyższą efektywność wykorzystania krzemu, ograniczenie strat związanych

z depozycją powierzchniową oraz bardziej przewidywalny efekt działania. Jednocześnie H_4SiO_4 jest formą termodynamicznie nietrwałą w wyższych stężeniach i w warunkach sprzyjających kondensacji. W konsekwencji skuteczność nowoczesnych formułacji krzemowych zależy w dużej mierze od stabilizacji monomerycznej formy kwasu ortokrzemowego oraz ograniczenia procesów jego kondensacji w trakcie przechowywania i aplikacji. Praktyczne potwierdzenie tej zależności stanowią badania nad pszenicą jarą w systemie rolnictwa ekologicznego, które wykazały, że płynna formułacja krzemu (roztwór kwasu monokrzemowego) jest skuteczniejsza od formy proszkowej (ziemi okrzemkowej) w poprawie parametrów wzrostu i plonowania roślin. Wykazano przy tym, że najlepsze efekty agromiczne uzyskuje się poprzez łączenie aplikacji doglebowej z dolistną, co wskazuje na kluczowe znaczenie formy chemicznej i metody podania krzemu dla efektywności jego wykorzystania przez rośliny (Kowalska i wsp. 2021).

Nanokrzemionka (SiO_2 w skali nanometrycznej) stanowi jedną z najbardziej zaawansowanych form krzemu wykorzystywaną w rolnictwie. Jej właściwości wynikają przede wszystkim z bardzo małych rozmiarów cząsteczek (zwykle poniżej 100 nm) oraz dużej powierzchni właściwej, sięgającej kilkuset m^2/g (Janmohammadi i wsp. 2016; Rastogi i wsp. 2019). W przeciwieństwie do form monomerycznych, nanokrzemionka nie jest bezpośrednio rozpuszczalna ani natychmiast przyswajalna przez rośliny. Jej działanie opiera się na stopniowej solubilizacji w środowisku glebowym, interakcjach z wydzielinami korzeniowymi oraz modyfikacji właściwości powierzchniowych prowadzących do powstawania form biodostępnych (Qados i Abdul 2015; Khan 2025). W warunkach naturalnych może dochodzić do częściowej hydratacji cząsteczek i powstawania kwasu ortokrzemowego, który stanowi główną formę pobieraną przez rośliny (Jurkić i wsp. 2013; Sahebi i wsp. 2015). Nanokrzemionka może oddziaływać na rośliny zarówno bezpośrednio, jak i pośrednio. Jej obecność w ryzosferze może modyfikować dostępność składników pokarmowych poprzez właściwości sorpcyjne i chelatujące, a także wpływać na aktywność mikroorganizmów glebowych oraz właściwości fizykochemiczne gleby. W efekcie obserwuje się poprawę efektywności wykorzystania makro- i mikroelementów oraz zwiększenie stabilności środowiska korzeniowego (Rastogi i wsp. 2019; Rajput i wsp. 2021). Badania wskazują, że nanokrzemionka może wpływać na wzrost i rozwój roślin, zwiększając ich tolerancję na stesy abiotyczne, jednak skala efektu jest silnie zależna od dawki, formułacji oraz warunków środowiskowych (Qados i wsp. 2014; Siddiqui i wsp. 2014; Qados i Abdul 2015; Abdel-Halim i wsp. 2017; Kopittke i wsp. 2017; Avestan i wsp. 2019; Rastogi i wsp. 2019; Ghorbanpour i wsp. 2020; Desoky i wsp. 2021; Muhammad i wsp. 2025). Dzięki temu rośliny wykazują zwiększoną tolerancję na stres oksydacyjny. W aplikacjach dolistnych nanocząsteczki wykazują dużą zdolność do

adsorpcji na powierzchni liści oraz ograniczoną penetrację przez mikropory kutykuli i aparaty szparkowe. Po wnikięciu mogą tworzyć cienką warstwę ochronną na ścianach komórkowych epidermy, co zwiększa wytrzymałość mechaniczną tkanek, ogranicza transpirację oraz zmniejsza presję patogenów. W przypadku aplikacji dogłębowej efekty są często bardziej wyraźne, co tłumaczy się zdolnością krzemu do kompleksowania składników pokarmowych i poprawy ich dostępności (Rastogi i wsp. 2019; Nazim i wsp. 2024). Nanokrzemionka może być pobierana przez rośliny drogą apoplastyczną, natomiast udział transportu symplastycznego, w tym mechanizmów, takich jak endocytoza czy udział

akwaporyn, jest postulowany, lecz nie został jednoznacznie potwierdzony we wszystkich układach eksperymentalnych (Wallace i wsp. 2006; Wang i wsp. 2023; Yan i wsp. 2024). Istotnym aspektem działania nanokrzemionki jest obecność grup silanolowych ($\equiv\text{Si}-\text{OH}$), które umożliwiają tworzenie wiązań z biopolimerami ścian komórkowych (np. celulozą, hemicelulozami czy ligniną). Prowadzi to do wzmacniania struktury ścian komórkowych oraz zwiększenia odporności roślin na stresy biotyczne i abiotyczne (Sheng i Chen 2020; Palakurthy i wsp. 2024). Zastosowanie nanokrzemionki w formie nanonawozów niesie ze sobą liczne korzyści, takie jak zwiększona efektywność działania przy niższych

Tabela 1. Porównanie właściwości i mechanizmów działania wybranych form krzemu stosowanych w rolnictwie

Table 1. Comparison of properties and mechanisms of action of selected silicon forms used in agriculture

Cecha/forma krzemu Feature/silicon form	Krzemiany (K, Na, Ca) Silicates (K, Na, Ca)	Kwas ortokrzemowy (H_4SiO_4) Orthosilicic acid (H_4SiO_4)	Nanokrzemionka (SiO_2) Nanosilica (SiO_2)
Stabilność w roztworze Stability in solution	wysoka (głównie w warunkach alkalicznych; podatne na przemiany chemiczne) high (predominantly under alkaline conditions; susceptible to chemical transformations)	niska (zwłaszcza przy wyższych stężeniach i pH; tendencja do polimeryzacji) low (especially at higher concentrations and pH; prone to polymerization)	niska (agregacja i sedimentacja; zależna od pH i stabilizacji koloidalnej) low (aggregation and sedimentation; dependent on pH and colloidal stabilization)
Ryzyko fitotoksyczności Phytotoxicity risk	podwyższone (wysokie pH, zasolenie) elevated (high pH, salinity)	niskie (forma naturalnie występująca i bezpośrednio pobierana) low (naturally occurring and directly assimilable form)	zależy od dawki, wielkości cząstek i formulacji dose, particle size, and formulation-dependent
Przenikanie przez kutykulę Cuticular penetration	ograniczone limited	umiarkowane–wysokie (zależne od formulacji i warunków) moderate–high (dependent on formulation and conditions)	zmienne (zależy od wielkości cząstek, stabilności dyspersji) variable (dependent on particle size and dispersion stability)
Mechanizm działania Mechanism of action	głównie powierzchniowy (zmiana pH, efekt ochronny, ograniczone pobieranie) primarily superficial (pH alteration, protective effect, restricted uptake)	bezpośrednie pobieranie + transport symplastyczny i apoplastyczny direct uptake + symplastic and apoplastic transport	fizykochemiczny (adsorpcja, interakcje powierzchniowe) + biologiczny (indukcja odporności) physicochemical (adsorption, surface interactions) + biological (resistance induction)
Biodostępność Bioavailability	niska (zwłaszcza dolistnie) low (especially via foliar application)	wysoka (forma bezpośrednio przyswajalna) high (directly assimilable form)	niska–umiarkowana (pośrednia; zależna od stopnia rozpuszczania do H_4SiO_4) low–moderate (indirect; dependent on dissolution rate into H_4SiO_4)
pH roztworu Solution pH	wysokie (silnie alkaliczne, >10) high (strongly alkaline, >10)	lekko kwaśne–obojętne slightly acidic to neutral	zależne od formulacji (często zbliżone do obojętnego) formulation-dependent (often near-neutral)

dawkach, możliwość ukierunkowanego dostarczania składników oraz poprawa wykorzystania nawozów konwencjonalnych (np. w połączeniu z NPK). Wykazano również, że zaprawianie nasion nanokrzemionką może stymulować procesy metaboliczne, poprawiać kiełkowanie oraz ograniczać negatywny wpływ toksycznych pierwiastków (Hasanaklou i wsp. 2023; Sembada i wsp. 2023). Zróżnicowanie właściwości fizykochemicznych, mobilności oraz mechanizmów działania poszczególnych form krzemu przekłada się bezpośrednio na ich efektywność agronomiczną i zakres zastosowań. Syntetyczne porównanie kluczowych cech omawianych form przedstawiono w tabeli 1.

Zróżnicowanie właściwości fizykochemicznych oraz mechanizmów działania poszczególnych form krzemu znajduje bezpośrednie odzwierciedlenie w formulacjach dostępnych na rynku, co uzasadnia potrzebę ich szczegółowej analizy porównawczej.

Analiza porównawcza preparatów krzemowych dostępnych na rynku / Comparative analysis of commercially available silicon fertilizers

Zestawienie produktów przedstawione w tabeli 2. potwierdza wysoki stopień heterogeniczności rynku preparatów krzemowych dostępnych w Polsce, obejmujący zarówno ich skład chemiczny, koncentrację substancji aktywnej, jak i sposób aplikacji oraz klasyfikację funkcjonalną. Szczególnie widoczna jest niespójność pomiędzy deklarowaną zawartością krzemu, a jego rzeczywistą formą chemiczną, co znacząco ogranicza możliwość bezpośredniego porównywania efektywności poszczególnych produktów na podstawie parametrów ilościowych.

Problem dualizmu jednostek (Si vs SiO₂) i rozpiętość dawek / The problem of duality of units (Si vs SiO₂) and the dose range

Zakres deklarowanej zawartości krzemu jest bardzo szeroki i obejmuje wartości od poniżej 1% w preparatach opartych na kwasie ortokrzemowym (np. Megis 0,73% Si) do ponad 92% SiO₂ w produktach mineralnych, takich jak ziemia okrzemkowa (np. Adesil), co wyraźnie ilustrują dane zestawione w tabeli 2. Zróżnicowanie to nie przekłada się jednak liniowo na skuteczność agronomiczną. Preparaty o najwyższej zawartości krzemu, szczególnie w grupie stymulatorów i środków wspomagających, zawierają go najczęściej w formach trudno rozpuszczalnych, co ogranicza jego dostępność dla roślin w krótkim okresie po aplikacji. Istotnym ograniczeniem analizy porównawczej jest brak standaryzacji w sposobie deklarowania zawartości krzemu. W analizowanych produktach stosowane są zarówno wartości wyrażone jako krzem całkowity (Si) oraz jako ditlenek krzemu (SiO₂). Warto podkreślić, że przeliczenie to opiera się na masach molowych pierwiastków, gdzie czysty krzem stanowi jedynie 467% masy cząsteczkowej ditlenku krzemu, zgodnie z zależnościami:

$$\text{Si} = \text{SiO}_2 \times 0,467$$

$$\text{SiO}_2 = \text{Si} \times 2,14$$

W wielu przypadkach producenci nie podają informacji umożliwiających ich bezpośrednie przeliczenie lub jednoznaczne określenie formy, co utrudnia rzetelną ocenę rzeczywistej zawartości składnika aktywnego pomiędzy preparatami. W konsekwencji wysoka zawartość SiO₂ nie stanowi wiarygodnego i wiarygodnego wskaźnika efektywności biologicznej.

Podejście technologiczne a biodostępność formulacji / Technological aspects of formulation bioavailability

Analiza form chemicznych wskazuje na współistnienie kilku odmiennych podejść technologicznych:

- * **Grupa nawozów:** dominują tu krzemiany potasu i wapnia (np. Algasoil, Barrier Si-Ca). Charakteryzują się one relatywnie wysoką zawartością krzemu, lecz ich przyswajalność może być ograniczona przez warunki środowiskowe, w tym pH oraz procesy polimeryzacji,
- * **Preparaty oparte na kwasie ortokrzemowym:** mimo niskiej koncentracji krzemu całkowitego (np. Megis, ZumSil), cechują się najwyższą bezpośrednią biodostępnością, wynikającą z obecności form monomerycznych zdolnych do szybkiej absorpcji przez rośliny,
- * **Grupa stymulatorów:** obserwuje się tutaj wykorzystanie soli kwasu krzemowego oraz formulacji opartych na aktywowanych minerałach krzemionkowych czy ziemi okrzemkowej aktywowanej kwasem (np. SiliTom),
- * **Środki wspomagające:** stanowią odrębną kategorię mineralną, bazującą na surowcach, takich jak mączki bazaltowe. W ich przypadku krzem pozostaje związany w strukturach krystalicznych o niskiej rozpuszczalności, a jego działanie ma charakter pośredni i długoterminowy, związany przede wszystkim z poprawą właściwości fizykochemicznych gleby. Mechanizm ten istotnie różni się od działania preparatów dolistnych, co uniemożliwia ich bezpośrednie porównanie.

Drogi aplikacji i strategie rejestracyjne / Routes of application and registration strategies

Na uwagę zasługuje znaczny stopień niejednorodności danych deklaracyjnych. W analizowanych produktach najmniej brakuje informacji o formie chemicznej krzemu, co uniemożliwia jednoznaczną ocenę jego biodostępności oraz przewidywanego mechanizmu działania (tab. 2). Problem ten ogranicza transparentność rynku i utrudnia porównywalność preparatów, zarówno w segmencie nawozów, jak i stymulatorów.

Istotnym elementem różnicującym jest także sposób aplikacji. Większość nawozów i stymulatorów przeznaczona jest do stosowania dolistnego w formie płynnej, co sprzyja szybkiemu efektowi fizjologicznemu. Natomiast środki wspomagające aplikowane są głównie doglebowo

Tabela 2. Wykaz wybranych nawozów, stymulatorów i środków wspomagających zawierających krzem (Si) znajdujących się w wykazie nawozów i środków wspomagających uprawę roślin

Table 2. List of selected fertilizers, biostimulants and plant support products containing silicon (Si) included in the official register of fertilizers and plant support products

Lp. No.	Nazwa handlowa Trade name	Producent Manufacturer	Forma chemiczna krzemu Chemical form of silicon	Deklarowana zawartość krzemu Declared silicon content	Status prawny Legal status	Stosowanie/postać Application method/form
Nawozy – Fertilizers						
1.	Algasoil	Agrosimex Sp. z o.o.	krzemian potasu potassium silicate	SiO ₂ – 20,11%	nawóz fertilizator	dolistnie/płynna foliar/liquid
2.	Barrier Si-Ca	Osadkowski Sp. z o.o.	krzemian wapnia calcium silicate	SiO ₂ – 19,47%	nawóz fertilizator	dolistnie/płynna foliar/liquid
3.	Krzem/Megis	ICB Pharma Sp. j.	kwask ortokrzemowy orthosilicic acid	Si – 0,73% (2,5% kwasu – acid)	nawóz fertilizator	dolistnie/płynna foliar/liquid
4.	Optysil Calcium	Intermag Sp. z o.o.	n.d.	Si – 4,9%	nawóz fertilizator	dolistnie/stała foliar/solid
5.	Plonochron Active Plus	PPH Ekodarpol	n.d.	n.d.	nawóz fertilizator	n.d.
6.	Sarmin maKSi	Ciech Sarzyna S.A.	n.d.	Si – 13,6%	nawóz fertilizator	dolistnie/płynna foliar/liquid
7.	Zielony Wapń, SiTiCa	Mak Organic Sp. z o.o.	n.d.	SiO ₂ – 15,5%	nawóz fertilizator	dolistnie/stała foliar/solid
8.	Elvita SiMax	Intermag Sp. z o.o.	n.d.	SiO ₂ – 8,5%	nawóz fertilizator	dolistnie/płynna foliar/liquid
9.	Insol Krzem 100	Intermag Sp. z o.o.	n.d.	Si – 3,7%	nawóz fertilizator	dolistnie/płynna foliar/liquid
10.	SIL – Org	PHU „Jeznach” Sp. z o.o.	n.d.	SiO ₂ – 9,9%	nawóz fertilizator	dolistnie/płynna foliar/liquid
Stymulatory – Stimulants						
1.	ASX Krzem Plus/Silineo/Acti Krzem/Krzem Efekt	Agrosimex Sp. z o.o.	n.d.	Si – 2,5%	stymulator stimulant	dolistnie/płynna foliar/liquid
2.	Ingreen Bloomi/Ingreen Krzem–Jod	JIW Inwex Sp. z o.o.	sól potasowa kwasu krzemowego potassium silicate	SiO ₂ – 11,53%	stymulator stimulant	dolistnie/płynna foliar/liquid
3.	Nanosilan	EkoAgro Technology Sp. z o.o.	n.d.	SiO ₂ – 74,90%	stymulator stimulant	dolistnie, przedsiwianie/stała foliar, pre-sowing/solid form
4.	SiliTom	EMC Denarius	amorficzna ziemia okrzemkowa aktywowana kwasem ortokrzemowym acid-activated amorphous diatomaceous earth with orthosilicic acid	SiO ₂ – 30,6%	stymulator stimulant	doglebowo, dolistnie/stała soil, foliar/solid form
5.	ZumSil	EMC Denarius	kwask ortokrzemowy orthosilicic acid	SiO ₂ – 18,83%	stymulator stimulant	dolistnie/płynna foliar/liquid
6.	Adesil	EMC Denarius	ziemia okrzemkowa diatomaceous earth	SiO ₂ – 92%	stymulator stimulant	dolistnie/stała foliar/solid
7.	Krzemix	ZPUH „Best-Pest” Sp. j.	n.d.	n.d.	stymulator stimulant	dolistnie/płynna foliar/liquid
8.	Optysil	Intermag Sp. z o.o.	n.d.	Si – 16,5%	stymulator stimulant	dolistnie/płynna foliar/liquid

Tabela 2. Wykaz wybranych nawozów, stymulatorów i środków wspomagających zawierających krzem (Si) znajdujących się w wykazie nawozów i środków wspomagających uprawę roślin – cd.**Table 2.** List of selected fertilizers, biostimulants and plant support products containing silicon (Si) included in the official register of fertilizers and plant support products – continued

Lp. No.	Nazwa handlowa Trade name	Producent Manufacturer	Forma chemiczna krzemu Chemical form of silicon	Deklarowana zawartość krzemu Declared silicon content	Status prawny Legal status	Stosowanie/postać Application method/form
9.	Krzemowit	Biodevas Laboratoires	n.d.	n.d.	stymulator stimulant	n.d.
10.	GumiSil-B	RES Sp. z o.o.	n.d.	Si – 17%	stymulator stimulant	dolistnie/płynna foliar/liquid
11.	GumiSil-A	RES Sp. z o.o.	n.d.	Si – 15%	stymulator stimulant	dolistnie/płynna foliar/liquid
12.	GumiSil-C	RES Sp. z o.o.	n.d.	Si – 20%	stymulator stimulant	dolistnie/płynna foliar/liquid
13.	GumiSil-D	RES Sp. z o.o.	n.d.	Si – 22%	stymulator stimulant	dolistnie/płynna foliar/liquid
Środki wspomagające – Adjuvants						
1.	Vimo Plant Krzem	Vimo Sp. z o.o.	n.d.	n.d.	środek wspomagający adjuvant	doglebowo/stała soil application/solid form
2.	Florovit Agro bazalt granulowany	Grupa Inco S.A.	mączka bazaltowa basalt meal	SiO ₂ – 44%	środek wspomagający adjuvant	doglebowo/stała soil application/solid form
3.	Solactiv Evo	NaturalCrop Poland Sp. z o.o.	n.d.	Si – 34%	środek wspomagający adjuvant	doglebowo/stała soil application/solid form
4.	Mączka bazaltowa	Eurovia Bazalty S.A.	mączka bazaltowa basalt meal	n.d.	środek wspomagający adjuvant	doglebowo/stała soil application/solid form
5.	Mączka bazaltowa	P.P.H.U. „Dolpol”	mączka bazaltowa basalt meal	SiO ₂ – 45,58%	środek wspomagający adjuvant	doglebowo/stała soil application/solid form
6.	Plantimax Minerals	Doran Group Sp. z o.o.	n.d.	SiO ₂ – 4,28%	środek wspomagający adjuvant	doglebowo/stała soil application/solid form
7.	Natural Mineralizing Soil Improver	Goshka Sp. z o.o.	n.d.	SiO ₂ – 45%	środek wspomagający adjuvant	doglebowo/stała soil application/solid form
8.	NB Magma, NB Minerals	„Grafmind” Marcin Łubianka	mączka bazaltowa basalt meal	n.d.	środek wspomagający adjuvant	doglebowo/stała soil application/solid form
9.	Biobazalt	Lafarge Kruszywa i Beton Sp. z o.o.	mączka bazaltowa basalt meal	SiO ₂ – 39%	środek wspomagający adjuvant	doglebowo/stała soil application/solid form
10.	Mikrobazalt	Lafarge Kruszywa i Beton Sp. z o.o.	mączka bazaltowa basalt meal	n.d.	środek wspomagający adjuvant	doglebowo/stała soil application/solid form

n.d. – brak danych – no data

Źródło: opracowanie własne na podstawie rejestru MRiRW

Source: own elaboration based on the MRiRW register

w formie stałej, realizując funkcję długoterminowego oddziaływania na środowisko glebowe.

Dodatkowo obserwuje się współlistnienie różnych kategorii regulacyjnych (nawozów, stymulatorów oraz środków

wspomagających), przy czym klasyfikacja ta nie zawsze koreluje bezpośrednio ze składem chemicznym produktu. Sugeruje to, że przypisanie do określonej grupy funkcjonalnej wynika nie tylko z obiektywnych właściwości fizykochemicznych preparatu, lecz także z przyjętej przez producenta strategii rejestracyjnej oraz sposobu deklarowania jego działania. Wysoki poziom zróżnicowania rynku oraz ograniczona transparentność danych jednoznacznie wskazują na pilną potrzebę standaryzacji metod oceny preparatów krzemowych oraz ujednolicenia sposobu prezentacji informacji przez producentów.

Ramy prawne funkcjonowania produktów nawozowych i biostymulatorów roślin w Unii Europejskiej / Regulatory framework for fertilizers and plant biostimulants in the European Union

Zidentyfikowana w analizie rynku niejednorodność składu, sposobu deklarowania oraz klasyfikacji preparatów krzemowych znajduje swoje odzwierciedlenie w obowiązujących ramach prawnych regulujących ich wprowadzanie do obrotu. Podstawowym aktem normatywnym w Unii Europejskiej jest rozporządzenie (UE) 2019/1009, które wprowadza system oparty na kategoriach funkcjonalnych produktu (Product Function Categories – PFC). Porządkuje ono środki według ich podstawowej funkcji agronomicznej oraz mechanizmu działania, a nie wyłącznie składu chemicznego. Podejście to stanowi istotną zmianę względem wcześniejszych regulacji i ma szczególne znaczenie dla preparatów krzemowych, których aktywność wykracza poza klasyczne dostarczanie składników pokarmowych.

W ramach tego systemu analizowane produkty krzemowe mogą być przypisywane do trzech głównych kategorii:

- **Kategoria PFC 1 (Nawozy):** definiowane jako materiały przeznaczone do bezpośredniego dostarczania roślinom składników pokarmowych lub poprawy efektywności ich wykorzystania. W kontekście krzemu klasyfikacja ta bywa niejednoznaczna, ponieważ nie jest on powszechnie uznawany za pierwiastek niezbędny dla wszystkich gatunków, mimo jego udokumentowanej roli w indukowaniu odporności,
- **Kategoria PFC 3 (Polepszacze gleby):** ich funkcją jest poprawa właściwości fizycznych, chemicznych lub biologicznych gleby. W przypadku krzemu dotyczy to przede wszystkim preparatów opartych na surowcach mineralnych (zeolity, mączki skalne, ziemia okrzemkowa), w których pierwiastek ten występuje w formach trudno rozpuszczalnych o długofalowym, pośrednim działaniu,
- **Kategoria PFC 6 (Biostymulatory roślin):** obejmuje produkty stymulujące procesy odżywiania niezależnie od zawartości składników pokarmowych, ukierunko-

wane na efektywność wykorzystania niszy ekologicznej, tolerancję na stresy abiotyczne oraz jakość plonu. Krzem, ze względu na swoje wielopoziomowe działanie przeciwstresowe, w sposób szczególny wpisuje się w tę kategorię, odzwierciedlając współczesną zmianę paradygmatu w rolnictwie.

Istotnym wyzwaniem rynkowym jest fakt, że klasyfikacja produktów krzemowych w systemie PFC zależy w dużej mierze od deklarowanego przez producenta mechanizmu działania oraz przyjętej strategii rejestracyjnej. W konsekwencji produkty o zbliżonym składzie fizykochemicznym mogą funkcjonować w obrocie na zupełnie różnych zasadach prawnych.

Dodatkowo, pomimo unijnej harmonizacji, rynek pozostaje spolaryzowany przez współistnienie przepisów krajowych (np. jako środki wspomagające uprawę roślin), co potęguje chaos interpretacyjny. Ponieważ krzem jednocześnie modyfikuje środowisko glebowe i bezpośrednio stymuluje fizjologię roślin, granice między poszczególnymi kategoriami PFC mają charakter płynny, co stanowi jedno z kluczowych wyzwań regulacyjnych i naukowych współczesnej agronomii.

Wnioski / Conclusions

Przeprowadzona analiza wskazuje, że preparaty krzemowe stanowią zróżnicowaną i dynamicznie rozwijającą się grupę produktów, których efektywność agronomiczna zależy przede wszystkim od formy chemicznej krzemu oraz jego biodostępności, a nie od całkowitej zawartości pierwiastka w formulacji. Wskazuje to na pilną potrzebę przesunięcia punktu ciężkości oceny tych produktów z kryteriów ilościowych na jakościowe.

Główne problemy zidentyfikowane na polskim rynku rolniczym obejmują:

1. Brak standaryzacji w zakresie deklarowania zawartości krzemu (równoległe, nieprzeliczalne stosowanie jedno-
stek Si i SiO₂),
2. Niedostateczną transparentność informacyjną producentów w odniesieniu do rzeczywistej formy chemicznej składnika aktywnego,
3. Niejednorodne podejście regulacyjne wynikające z płynnych granic funkcjonalnych w systemie rejestracji (PFC).

Wykazane dysproporcje jednoznacznie wskazują na potrzebę intensyfikacji badań nad biodostępnością poszczególnych generacji krzemu oraz wypracowania ujednoliconych norm raportowania parametrów jakościowych. Standaryzacja ta jest warunkiem koniecznym, zarówno dla obiektywnego prowadzenia eksperymentów naukowych, jak i dla racjonalnego, przewidywalnego wykorzystania potencjału krzemu w praktyce rolniczej.

Literatura/ References

- Abberton M., Batley J., Bentley A., Bryant J., Cai H., Cockram J., de Oliveira A.C., Cseke L.J., Dempewolf H., De Pace C., Edwards D., Gepts P., Greenland A., Hall A.E., Henry R., Hori K., Howe G.T., Hughes S., Humphreys M., Lightfoot D., Marshall A., Mayes S., Nguyen H.T., Ogonnaya F.C., Ortiz R., Paterson A.H., Tuberosa R., Valliyodan B., Varshney R.K., Yano M. 2016. Global agricultural intensification during climate change: a role for genomics. *Plant Biotechnology Journal* 14 (4): 1095–1098. DOI: 10.1111/pbi.12467
- Abdel-Halim M.E., Hegazy H.S., Hassan N.S., Naguib D.M. 2017. Effect of silica ions and nano silica on rice plants under salinity stress. *Ecological Engineering* 99: 282–289. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2016.11.060
- Ahire M.L., Mundada P.S., Nikam T.D., Bapat V.A., Penna S. 2021. Multifaceted roles of silicon in mitigating environmental stresses in plants. *Plant Physiology and Biochemistry* 169: 291–310. DOI: 10.1016/j.plaphy.2021.11.010
- Avestan S., Ghasemnezhad M., Esfahani M., Byrt C.S. 2019. Application of nano-silicon dioxide improves salt stress tolerance in strawberry plants. *Agronomy* 9 (5): 246. DOI: 10.3390/agronomy9050246
- Awasthi S., Chauhan R., Srivastava S. 2022. The importance of beneficial and essential trace and ultratrace elements in plant nutrition, growth, and stress tolerance. s. 27–46. W: *Plant Nutrition and Food Security in the Era of Climate Change* (V. Kumar, A.K. Srivastava, P. Suprasanna, red.). Academic Press, 574 ss. ISBN 978-0-12-822916-3. eISBN 978-0-12-823093-0. DOI: 10.1016/B978-0-12-822916-3.00001-9. DOI: 10.1016/C2019-0-04692-4
- Bazakos C., Vidović M., Radanović A., Bacu A., Francesca S., Rigano M.M. 2026. Multi-level approaches for assessing molecular and physiological traits of drought and heat stress tolerance in plant reproductive development. *Physiologia Plantarum* 178 (1): e70760. DOI: 10.1111/ppl.70760
- Beacham A.M., Hand P., Barker G.C., Denby K.J., Teakle G.R., Walley P.G., Monaghan J.M. 2018. Addressing the threat of climate change to agriculture requires improving crop resilience to short-term abiotic stress. *Outlook on Agriculture* 47 (4): 270–276. DOI: 10.1177/0030727018807722
- Brahma R., Ahmed P., Choudhury M. 2020. Silicon nutrition for alleviation of abiotic stress in plants: A review. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry* 9 (4): 1374–1381.
- Chaudhry S., Sidhu G.P.S. 2022. Climate change regulated abiotic stress mechanisms in plants: a comprehensive review. *Plant Cell Reports* 41 (1): 1–31. DOI: 10.1007/s00299-021-02759-5
- Chen D., Wang S., Yin L., Deng X. 2018. How does silicon mediate plant water uptake and loss under water deficiency? *Frontiers in Plant Science* 9: 281. DOI: 10.3389/fpls.2018.00281
- Desoky E.S.M., Mansour E., El-Sobky E.S.E., Abdul-Hamid M.I., Taha T.F., Elakkad H.A., Arnaout S.M.A.I., Eid R.S.M., El-Tarabily K.A., Yasin M.A. 2021. Physio-biochemical and agronomic responses of faba beans to exogenously applied nano-silicon under drought stress conditions. *Frontiers in Plant Science* 12: 637783. DOI: 10.3389/fpls.2021.637783
- Exley C. 2015. A possible mechanism of biological silicification in plants. *Frontiers in Plant Science* 6: 853. DOI: 10.3389/fpls.2015.00853
- Exley C., Guerriero G., Lopez X. 2019. Silicic acid: The omniscient molecule. *Science of the Total Environment* 665: 432–437. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.02.197
- George T.S., Taylor M.A., Dodd I.C., White P.J. 2017. Climate change and consequences for potato production: a review of tolerance to emerging abiotic stress. *Potato Research* 60 (3): 239–268. DOI: 10.1007/s11540-018-9366-3
- Ghorbanpour M., Mohammadi H., Kariman K. 2020. Nanosilicon-based recovery of barley (*Hordeum vulgare*) plants subjected to drought stress. *Environmental Science: Nano* 7 (2): 443–461. DOI: 10.1039/C9EN00973F
- Guo Y., Ouyan S., Chen J., Lin Z., Xiao C., Liu D., Chen G., Zhang Q. 2026. Diatomaceous bio-silicon as a sustainable alternative to mineral silicon fertilizers: impacts on rice yield, soilfertility, and heavy metal dynamics. *Plant and Soil* 519 (1): 451–468. DOI: 10.1007/s11104-025-08121-y
- Hasanaklou N.T., Mohagheghi V., Hasanaklou H.T., Ma'mani L., Malekmohammadi M., Moradi F., Dalvand Y. 2023. Seed nano-priming using silica nanoparticles: effects in seed germination and physiological properties of *Stevia rebaudiana* Bertoni. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture* 10 (1): 96. DOI: 10.21203/rs.3.rs-2867746/v1
- Janmohammadi M., Amanzadeh T., Sabaghnia N., Dashti S. 2016. Impact of foliar application of nano micronutrient fertilizers and titanium dioxide nanoparticles on the growth and yield components of barley under supplemental irrigation. *Acta Agriculturae Slovenica* 107 (2): 265–276. DOI: 10.14720/aas.2016.107.2.01
- Jurkić L.M., Cepanec I., Pavelić S.K., Pavelić K. 2013. Biological and therapeutic effects of ortho-silicic acid and some ortho-silicic acid-releasing compounds: New perspectives for therapy. *Nutrition & Metabolism* 10 (1): 2. DOI: 10.1186/1743-7075-10-2
- Kaur S., Kaur N., Siddique K.H., Nayyar H. 2016. Beneficial elements for agricultural crops and their functional relevance in defence against stresses. *Archives of Agronomy and Soil Science* 62 (7): 905–920. DOI: 10.1080/03650340.2015.1101070
- Khan A.L. 2025. Silicon: A valuable soil element for improving plant growth and CO₂ sequestration. *Journal of Advanced Research* 71: 43–54. DOI: 10.1016/j.jare.2024.05.027
- Kohay H., Wielinski J., Reiser J., Perkins L.A., Ristroph K., Giraldo J.P., Lowry G.V. 2025. Nanocarrier foliar uptake pathways affect delivery of active agents and plant physiological response. *Environmental Science: Nano* 12 (1): 660–674. DOI: 10.1039/d4en00547c
- Kopittke P.M., Gianoncelli A., Kourousias G., Green K., McKenna B.A. 2017. Alleviation of Al toxicity by Si is associated with the formation of Al–Si complexes in root tissues of sorghum. *Frontiers in Plant Science* 8: 2189. DOI: 10.3389/fpls.2017.02189
- Kowalska J., Tyburski J., Jakubowska M., Krzysińska J. 2021. Effect of different forms of silicon on growth of spring wheat cultivated in organic farming system. *Silicon* 13 (1): 211–217. DOI: 10.1007/s12633-020-00414-4
- Kumar A., Choudhary A., Kaur H., Singh K., Guha S., Choudhary D.R., Husen A. 2025. Exploring the role of silicon in enhancing sustainable plant growth, defense system, environmental stress mitigation and management. *Discover Applied Sciences* 7 (5): 406. DOI: 10.1007/s42452-025-06866-w
- Laane H.M. 2018. The effects of foliar sprays with different silicon compounds. *Plants* 7 (2): 45. DOI: 10.3390/plants7020045

- Liang Y., Nikolic M., Bélanger R., Gong H., Song A. 2015. Silicon uptake and transport in plants: physiological and molecular aspects. s. 69–82. W: *Silicon in Agriculture: From Theory to Practice* (Y. Liang, M. Nikolic, R. Bélanger, H. Gong, A. Song, red.). Springer Science + Business Media Dordrecht. ISBN 978-94-017-9977-5. eISBN 978-94-017-9978-2. DOI: 10.1007/978-94-017-9978-2
- Liu X., Liu C., Meng C. 2019. Oligomerization of silicic acids in neutral aqueous solution: a first-principles investigation. *International Journal of Molecular Sciences* 20 (12): 3037. DOI: 10.3390/ijms20123037
- López-Pérez M.C., Pérez-Labrada F., Ramírez-Pérez L.J., Juárez-Maldonado A., Morales-Díaz A.B., González-Morales S., García-Dávila L.R., García-Mata J., Benavides-Mendoza A. 2018. Dynamic modeling of silicon bioavailability, uptake, transport, and accumulation: applicability in improving the nutritional quality of tomato. *Frontiers in Plant Science* 9: 647. DOI: 10.3389/fpls.2018.00647
- Ma J.F. 2010. Silicon transporters in higher plants. s. 99–109. W: *MIPs and Their Role in the Exchange of Metalloids*. Advances in Experimental Medicine and Biology, vol. 679 (T.P. Jahn, G.P. Bienert, red.). Springer, New York. ISBN 978-1-4419-6314-7. eISBN 978-1-4419-6315-4. DOI: 10.1007/978-1-4419-6315-4_8
- Ma J.F., Yamaji N. 2008. Functions and transport of silicon in plants. *Cellular and Molecular Life Sciences* 65 (19): 3049–3057. DOI: 10.1007/s00018-008-7580-x
- Mandlik R., Thakral V., Raturi G., Shinde S., Nikolić M., Tripathi D.K., Sonah H., Deshmukh R. 2020. Significance of silicon uptake, transport, and deposition in plants. *Journal of Experimental Botany* 71 (21): 6703–6718. DOI: 10.1093/jxb/eraa301
- Muhammad S., Ulhassan Z., Munir R., Yasin M.U., Islam F., Zhang K., Chen W., Jan M., Afzal M., Muhammad A., Hannan F., Zhou W. 2025. Nanosilica and salicylic acid synergistically regulate cadmium toxicity in rice. *Environmental Pollution* 364: 125331. DOI: 10.1016/j.envpol.2024.125331
- Mukarram M., Zehra A., Afzal S., Sliacka Konôpková A., Khan K.A., Alqahtani A.R., El-Mekkawy H.I., Kuriaj D., Lux A., Chen R., Li Q. 2025. Beyond essentiality: silicon as a systems regulator of photosynthesis under stress scenarios. *Frontiers in Plant Science* 16: 1690421. DOI: 10.3389/fpls.2025.1690421
- Nawaz M.A., Zakharenko A.M., Zemchenko I.V., Haider M.S., Ali M.A., Imtiaz M., Golokhvast K.S. 2019. Phytolith formation in plants: from soil to cell. *Plants* 8 (8): 249. DOI: 10.3390/plants8080249
- Nazim M., Li X., Anjum S., Ahmad F., Ali M., Muhammad M., Zulfiqar U. 2024. Silicon nanoparticles: A novel approach in plant physiology to combat drought stress in arid environment. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology* 58: 103190. DOI: 10.3390/plants8080249
- Neeru J., Shaliesh C., Vaishali T., Purav S., Manoharlal R. 2019. Role of orthosilicic acid (OSA) based formulation in improving plant growth and development. *Silicon* 11 (5): 2407–2411. DOI: 10.1007/s12633-015-9380-x
- Oshunsanya S.O., Nwosu N.J., Li Y. 2019. Abiotic stress in agricultural crops under climatic conditions. s. 71–100. W: *Sustainable Agriculture, Forest and Environmental Management* (M.K. Jhariya, A. Banerjee, R.S. Meena, D.K. Yadav, red.). Springer, Singapore, 622 ss. ISBN 978-98-113682-95. DOI: 10.1007/978-981-13-6830-1
- Palakurthy S., Houben L., Elbaum M., Elbaum R. 2024. Silica biomineralization with lignin involves Si–O–C bonds that stabilize radicals. *Biomacromolecules* 25 (6): 3409–3419. DOI: 10.1021/acs.biomac.4c00061
- Pavlovic J., Kostic L., Bosnic P., Kirkby E.A., Nikolic M. 2021. Interactions of silicon with essential and beneficial elements in plants. *Frontiers in Plant Science* 12: 697592. DOI: 10.3389/fpls.2021.697592
- Pommerrenig B., Diehn T.A., Bernhardt N., Bienert M.D., Mitani-Ueno N., Fuge J., Bieber A., Spitzer C., Bräutigam A., Ma J.F., Chaumont F., Bienert G.P. 2020. Functional evolution of nodulin 26-like intrinsic proteins: from bacterial arsenic detoxification to plant nutrient transport. *New Phytologist* 225 (3): 1383–1396. DOI: 10.1111/nph.16217
- Qados A., Abdul M.S. 2015. Mechanism of nanosilicon-mediated alleviation of salinity stress in faba bean (*Vicia faba* L.) plants. *American Journal of Experimental Agriculture* 7 (2): 78–95. DOI: 10.9734/AJEA/2015/15110
- Qados A., Abdul M.S., Moftah A.E. 2014. Influence of silicon and nano-silicon on germination, growth and yield of faba bean (*Vicia faba* L.) under salt stress conditions. *American Journal of Experimental Agriculture* 5 (6): 509–524. DOI: 10.9734/AJEA/2015/14109
- Rajput V.D., Minkina T., Feizi M., Kumari A., Khan M., Mandzhieva S., Choudhary R. 2021. Effects of silicon and silicon-based nanoparticles on rhizosphere microbiome, plant stress and growth. *Biology* 10 (8): 791. DOI: 10.3390/biology10080791
- Rastogi A., Tripathi D.K., Yadav S., Chauhan D.K., Živčák M., Ghorbanpour M., El-Sheery N.I., Brestic M. 2019. Application of silicon nanoparticles in agriculture. *3 Biotech* 9 (3): 90. DOI: 10.1007/s13205-019-1626-7
- Ruan D., Yang X., Li Z., Liu J., Xu H., Jiang J., Jiang J., Wu Q., Yuan Y. 2026. Silicon accumulation in Job's tears (*Coix lacryma-jobi* L.) partially replaces biomass carbon synthesis and enhances phytolith associated carbon sequestration potential. *Plant and Soil* 518 (1): 423–437. DOI: 10.1007/s11104-025-08007-z
- Sahebi M., Hanafi M.M., Siti Nor Akmar A., Rafii M.Y., Azizi P., Tengoua F.F., Azwa J.N.M., Shabanimofrad M. 2015. Importance of silicon and mechanisms of biosilica formation in plants. *BioMed Research International* 2015 (1): 396010. DOI: 10.1155/2015/396010
- Schaller J., Puppe D., Kaczorek D., Ellerbrock R., Sommer M. 2021. Silicon cycling in soils revisited. *Plants* 10 (2): 295. DOI: 10.3390/plants10020295
- Sembada A.A., Maki S., Faizal A., Fukuhara T., Suzuki T., Lenggono I.W. 2023. The role of silica nanoparticles in promoting the germination of tomato (*Solanum lycopersicum*) seeds. *Nanomaterials* 13 (14): 2110. DOI: 10.3390/nano13142110
- Sheng H., Chen S. 2020. Plant silicon-cell wall complexes: Identification, model of covalent bond formation and biofunction. *Plant Physiology and Biochemistry* 155: 13–19. DOI: 10.1016/j.plaphy.2020.07.020
- Shivaraj S.M., Mandlik R., Bhat J.A., Raturi G., Elbaum R., Alexander L., Tripathi D.K., Deshmukh R., Sonah H. 2022. Outstanding questions on the beneficial role of silicon in crop plants. *Plant and Cell Physiology* 63 (1): 4–18. DOI: 10.1093/pcp/pcab145
- Siddiqui M.H., Al-Wahaibi M.H., Faisal M., Al Sahli A.A. 2014. Nano-silicon dioxide mitigates the adverse effects of salt stress on *Cucurbita pepo* L. *Environmental Toxicology and Chemistry* 33 (11): 2429–2437. DOI: 10.1002/etc.2697
- Song X.P., Verma K.K., Tian D.D., Zhang X.Q., Liang Y.J., Huang X., Li C.N., Li Y.R. 2021. Exploration of silicon functions to integrate with biotic stress tolerance and crop improvement. *Biological Research* 54 (1): 19. DOI: 10.1186/s40659-021-00344-4

- Thakral V., Bhat J.A., Kumar N., Myaka B., Sudhakaran S., Patil G., Sonah H., Shivaraj S.M., Deshmukh R. 2021. Role of silicon under contrasting biotic and abiotic stress conditions provides benefits for climate smart cropping. *Environmental and Experimental Botany* 189: 104545. DOI: 10.1016/j.envexpbot.2021.104545
- Trejo-Téllez L.I., García-Jiménez A., Escobar-Sepúlveda H.F., Ramírez-Olvera S.M., Bello-Bello J.J., Gómez-Merino F.C. 2020. Silicon induces hormetic dose-response effects on growth and concentrations of chlorophylls, amino acids and sugars in pepper plants during the early developmental stage. *PeerJ* 8: e9224. DOI: 10.7717/peerj.9224
- Tubañá B.S., Heckman J.R. 2015. Silicon in soils and plants. s. 7–51. W: *Silicon and Plant Diseases* (F.A. Rodrigues, L.E. Datnoff, red.). Springer International Publishing, Switzerland, 148 ss. ISBN 978-3-319-22929-4. eISBN 978-3-319-22930-0. DOI 10.1007/978-3-319-22930-0
- van den Berg B., Pedebos C., Bolla J.R., Robinson C.V., Basle A., Khalid S. 2021. Structural basis for silicic acid uptake by higher plants. *Journal of Molecular Biology* 433 (21): 167226. DOI: 10.1016/j.jmb.2021.167226
- Velasco E., Aranda X., Hoube F., Ribes J., Araus J.L., García-Caparrós P. 2026. Interactive effects of silicon formulations, concentrations, and foliar application timing on rice physiology and yield. *Frontiers in Plant Science* 16: 1723079. DOI: 10.3389/fpls.2025.1723079
- Wadas W., Kondraciuk T. 2025. The role of foliar-applied silicon in improving the growth and productivity of early potatoes. *Agriculture* 15 (5): 556. DOI: 10.3390/agriculture15050556
- Wallace I.S., Choi W.G., Roberts D.M. 2006. The structure, function and regulation of the nodulin 26-like intrinsic protein family of plant aquaglyceroporins. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Biomembranes* 1758 (8): 1165–1175. DOI: 10.1016/j.bbamem.2006.03.024
- Wang X., Xie H., Wang P., Yin H. 2023. Nanoparticles in plants: uptake, transport and physiological activity in leaf and root. *Materials* 16 (8): 3097. DOI: 10.3390/ma16083097
- Yamaji N., Ma J.F. 2021. Metalloid transporters and their regulation in plants. *Plant Physiology* 187 (4): 1929–1939. DOI: 10.1093/plphys/kiab326
- Yan G., Huang Q., Zhao S., Xu Y., He Y., Nikolic M., Nikolic N., Liang Y., Zhu Z. 2024. Silicon nanoparticles in sustainable agriculture: synthesis, absorption, and plant stress alleviation. *Frontiers in Plant Science* 15: 1393458. DOI: 10.3389/fpls.2024.1393458
- Yan S.U., Rong H.A.N., Hao S.U.N., Hai-jun G.O.N.G. 2022. Nodulin 26-like intrinsic protein CsNIP2; 2 is a silicon influx transporter in *Cucumis sativus* L. *Journal of Integrative Agriculture* 21 (3): 685–696. DOI: 10.1111/nph.16217
- Zargar S.M., Mahajan R., Bhat J.A., Nazir M., Deshmukh R. 2019. Role of silicon in plant stress tolerance: opportunities to achieve a sustainable cropping system. *3 Biotech* 9 (3): 73. DOI: 10.1007/s13205-019-1613-z