

Brogowski Zygmunt

Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie

Krzem w glebie i jego rola w żywieniu roślin

Słowa kluczowe: krzem, krzemionka, minerały, pobieranie krzemionki przez rośliny, interakcja krzemionki z glinem, fosforem, metalami ciężkimi

Wstęp

Krzem (Si) jest jednym z najbardziej rozpowszechnionych, poza tlenem, pierwiastków na kuli ziemskiej. Stanowi on 26% całości skorupy ziemskiej i wchodzi w skład aż 377 minerałów skałotwórczych. W połączeniu z tlenem tworzy samodzielny minerał — kwarc (SiO_2), odporny na procesy wietrzenia fizycznego i chemicznego. Kwarc występuje jako samodzielny minerał w granitach, w piaskach, piaskowcach, glinach i innych utworach stanowiących tworzywo glebowe.

Krzem wykorzystywany jest ze względu na swoje właściwości w wielu gałęziach przemysłu, a między innymi w elektronice, stanowiąc podstawową część mikroprocesorów.

Krzem bierze udział w metabolizmie żywych organizmów zarówno roślinnych [1–34], jak i zwierzęcych [27]. Nie jest on również obojętny w metabolizmie organizmu człowieka.

Należy podkreślić, że pierwotne organizmy, które zjawiły się na ziemi w erze eozoicznej i paleozoicznej, zawierały w swych tkankach znaczące ilości krzemu. Przykładem tego są organizmy, które przetrwały do naszych czasów, jak np. skrzyp, okrzemki, sinice, widłaki, paprocie, miłorząb i inne. Gatunki powstające w drodze ewolucji w późniejszym okresie, w erze mezozoicznej, zawierają już w swych tkankach głównie węgiel i azot, a zawartość w nich krzemu obniżyła się w większości gatunków poniżej 1%. Stąd, obecnie w wielu gatunkach roślin młodszych ewolucyjnie w swoim rozwoju onto- czy też filogenetycznym krzem stanowi w ich części popielnej niewielki udział lub ilości śladowe. Części generatywne w większości obecnych gatunków roślin zawierają już śladowe ilości krzemu. Pozostaje on jeszcze w znaczących ilościach w słomie zbóż, źdźbłach traw łąkowych i niektórych częściach roślin dwuliściennych.

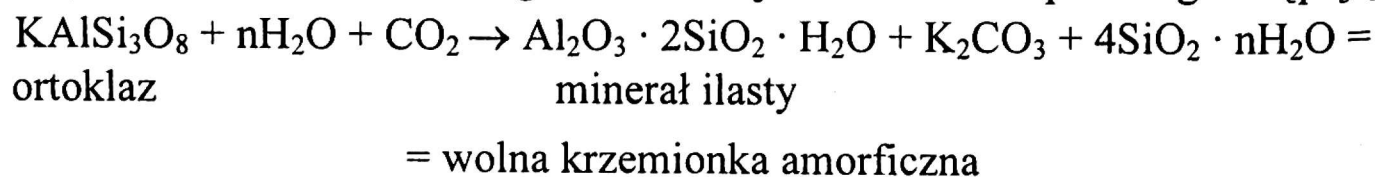
Krzemionka — $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ — bierze udział w wielu procesach glebowych i pośredniczy w pobieraniu składników z roztworów glebowych, zmniejszając jednocześnie toksyczne działanie soli w glebach słonych [1, 9, 26], glinu wymiennego w glebach kwaśnych [7, 8, 13, 14, 15, 17, 19, 21], metali ciężkich [20, 32] oraz uruchamiając składniki trudno dostępne dla roślin [28]. Zapobiega również wielu schorzeniom roślin uprawnych [3, 10, 18].

Stąd też celem niniejszego doniesienia jest przybliżenie niektórych zagadnień związanych z krzemem w glebach i roślinach. Są to ciągle zagadnienia mało poznane zarówno przez gleboznawców, jak i nawozowców, fizjologów roślin i innych specjalistów z dziedziny szeroko pojętego rolnictwa. W ostatnich dziesięciu latach literatura naukowa dotycząca zagadnień krzemu jako składnika nawozowego z roku na rok poszerza krąg zagadnień dotyczących tego pierwiastka [1–34 i inne]. Najintensywniej prowadzone są badania nad zastosowaniem krzemu w rolnictwie we wschodniej Azji, a szczególnie w Japonii i Korei, w mniejszym natomiast stopniu w innych krajach tamtego regionu. W Polsce zagadnieniem krzemionki w nawożeniu zajmowała się J. Krzysztofowiczowa w Katedrze Chemii Rolnej SGGW w połowie lat dwudziestych (praca nieosiągalna) pod kierunkiem M. Górskiego. Stwierdziła ona, że nawożenie owsa krzemionką w doświadczeniach wazonowych dało ten sam efekt co nawożenie fosforowe. Wyjaśnienie tego zjawiska nastąpiło dopiero w 1991r. w publikacji Ma i Takahashi [28]. Wcześniej podobną interpretację dostępności fosforu dla roślin z gleb ubogich w ten składnik podał Prianisznikow [29].

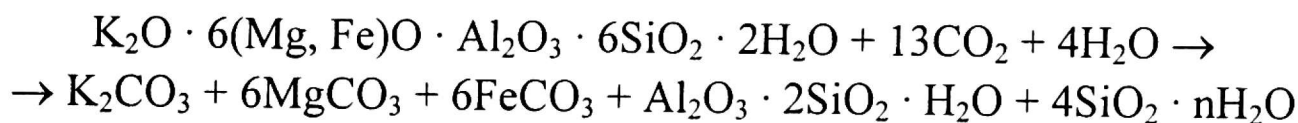
Krzem w glebie

Pierwiastek ten wchodzi w skład większości minerałów stanowiących tworzywo glebowe. W trakcie wietrzenia chemicznego minerałów pierwotnych, takich jak glinokrzemiany i krzemiany, może nastąpić uwalnianie niewielkich ilości krzemionki — $\text{SiO}_2 \times \text{H}_2\text{O}$, która nie została wykorzystana do budowy struktury minerałów wtórnych ilastych. Niektóre odmiany minerałów ilastych w określonych warunkach glebowych przegrupowują swoje struktury wewnętrzne i część czworościanów krzemu może zostać podstawiona izomorficznie przez inne pierwiastki. Uwolniona krzemionka o charakterze koloidalnym może zostać wykorzystana przez organizmy roślinne.

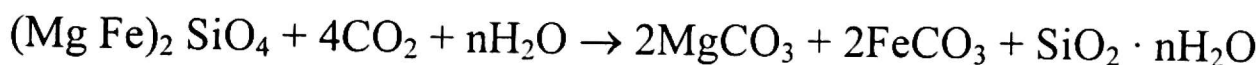
Wietrzenia chemiczne minerałów pierwotnych glinokrzemianowych i krzemianowych odbywa się w obecności dwutlenku węgla i wody. Przykład wietrzenia ortoklazu i powstanie minerału ilastego oraz wolnej krzemionki ma przebieg następujący:



Minerał ten jest bardzo odporny na procesy wietrzenia chemicznego. Stąd ilości krzemionki dostające się do gleby są nieznaczne. Łatwo wietrzejące minerały dostarczają większe ilości krzemionki wolnej, amorficznej, ale ich zawartość w tworzywie glebowym jest nieznaczna, jak np. biotyt — mika ciemna:

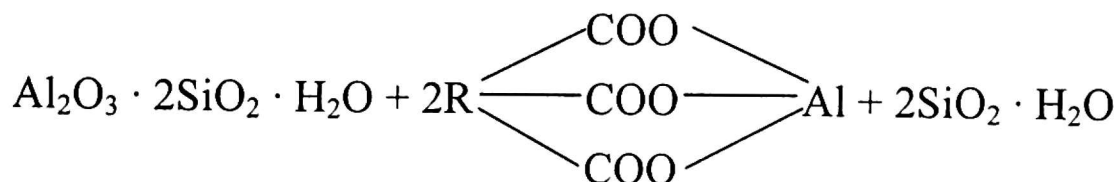


Również pirokseny, amfibole oraz oliwiny mogą dostarczać większe ilości krzemionki, ale również występują w nieznacznej ilości w większości utworów skalnych. Występują głównie w skałach diorytowych, gabrach, bazaltach. Natomiast w materiałach polodowcowych minerały te uległy już wcześniejszemu wietrzeniu. Minerały te, wietrzejąc w środowisku o małej zawartości glinu, nie tworzą minerałów ilastych i krzemionka uwolniona może pozostać w glebie dostępna dla roślin. Na przykład wietrzenie oliwinów



wyzwała cały zapas krzemionki wolnej — amorficznej i jeżeli nie zostanie ona wbudowana w struktury minerału ilastego, pozostaje do dyspozycji roślin.

Krzemionka może się również uwalniać w procesach glebotwórczych, takich jak bielicowanie i inne pokrewne procesy powodujące chemiczny rozpad nie tylko minerałów pierwotnych, ale nawet wtórnych — ilastych. Minerały ilaste w zetknięciu ze stosunkowo silnymi kwasami fulwowymi, powstającymi w trakcie humifikacji ściółki leśnej w silnie kwaśnym środowisku, powodują ich rozkład wg prawdopodobnej reakcji:



Rozpad np. kaolinitu w podany wyżej sposób uwalnia aż 46,5% SiO_2 . Rozpad montmorylonitu lub wermikulitu w powyższy sposób powoduje uwalnianie 48–50% SiO_2 — amorficznej.

Proces bielicowania powoduje, że wolna krzemionka, „osypka krzemionkowa” mówiąc potocznie, występuje w poziomach próchniczo-humusowych. Główne jej ilości gromadzą się w poziomach eluwialnych — wymycia — Ees* leżących bezpośrednio pod poziomami humusowymi — A. Stąd też gleby te mogą zawierać spore ilości wolnej, dostępnej dla roślin krzemionki. Silne zakwaszenie gleb bielicowych powoduje wytrącanie się krzemionki w formy nierozpuszczalne. Krzemionka amorficzna rozpuszcza się dopiero przy pH gleb powyżej 6. Natomiast gleby słone, silnie alkaliczne powodują, że krzemionka znajduje się w tych glebach w roztworze. Uwal-

* Poziom eluwialny — wymycia o zabarwieniu popielatym pochodzącym od krzemionki.

nia się ona również z minerałów pierwotnych — glinokrzemianów, a głównie z rozpadu minerałów ilastych w warunkach alkalicznych. Mimo sporej zawartości krzemionki — $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ w glebach kwaśnych i alkalicznych nie mamy dostatecznej wiedzy o jej dostępności dla roślin. Zachowanie się tego składnika w warunkach glebowych nie zostało w dostatecznym stopniu wyjaśnione. Nie został w dostatecznym stopniu wyjaśniony mechanizm wnikania tego składnika poprzez włosniki i korzenie do tkanek nadziemnych części poszczególnych gatunków roślin. Niektóre procesy glebotwórcze powodują ruchliwość krzemionki i jej transport pionowy w profilu glebowym do głębszych poziomów, np. w glebach słonych, laterytowych i innych. Ruch jej odbywa się głównie w glebach o odczynie obojętnym i alkalicznym. W glebach kwaśnych składnik ten ulega koagulacji i unieruchomieniu. Być może wapnowanie może uruchomić koagulatory krzemionki i spowodować jej dostępność dla roślin, podobnie jak wiele innych składników, np. fosforanów.

Rozpoznanie ilościowe krzemionki koloidalnej — mobilnej w glebach jest znikome. Można znaleźć sporadycznie opracowania z lat dwudziestych, trzydziestych, dotyczące ilości krzemionki w glebach rozpuszczalnej w 5% NaOH. Krzemionka — mimo iż bierze udział w niektórych procesach glebotwórczych, tworząc tzw. osypkę krzemionkową — nie znalazła szerszego zainteresowania wśród gleboznawców. Wydaje się, że jest to problem zaniedbany. Wynika to z braku zainteresowania tym składnikiem specjalistów od nawożenia oraz fizjologii roślin.

Krzem w roślinach

Rośliny wyższe różnią się znacznie pod względem zapotrzebowania na krzemionkę. Są gatunki, które akumulują znaczące ilości krzemu [24, 30, 31], np. skrzyp polny, ryż, trzcina cukrowa. Rośliny te akumulują 10–15% krzemionki w stosunku do suchej masy [30, 31]. Rośliny zbożowe i trawy akumulują do 3% krzemionki, a motylkowate i inne dwuliścienne — poniżej 0,5%. Stosunkowo znaczące ilości krzemionki zawie-

Tabela 1. Zawartość krzemionki (SiO_2) w popiele niektórych roślin [29]

Roślina	Procent popiołu	Procent SiO_2 w popiele
Pszenica — ziarno	2,1	1,5
Jęczmień — cała roślina	6,5	42,8
Koniczyna czerwona — kwitnienie	6,9	2,7
Ziemniaki — bulwy	3,8	2,0
Tytoń — liście	17,2	5,8
Chrzan — korzeń	8,5	7,2
Dąb — kora	7,2	0,6
Skrzyp — część nadziemna	26,7	70,6

rają niektóre warzywa, jak np. pomidory i ogórki, oraz krzewy jagodowe, takie jak agrest, porzeczki, maliny, truskawki, poziomki i czarna jagoda leśna. Nie wiemy, jak zachowują się inne rośliny leśne oraz grzyby. Przykład zawartości krzemionki w popiele niektórych roślin podaje Prianisznikow [29].

Funkcja krzemu w roślinach nie jest do końca wyjaśniona. Wielu badaczy uważa [2, 3, 4, 5, 11, 12, 16, 18, 22, 24, 30, 31 i inni], że krzem pobierany z gleby w postaci krzemionki SiO_2 spełnia wiele funkcji w roślinach. Między innymi, wchodząc w skład ścian komórkowych, powoduje sztywność źdźbeł ryżu, trzciny cukrowej, zbóż i innych roślin z rodziny traw. Stwierdzają oni, że nawożenie np. azotem powoduje u wymienionych wyżej roślin umiarkowane rozchylenie się liści w stosunku do łodygi i tym samym zmniejszenie dostępu do światła sąsiadującym roślinom. Tym między innymi tłumaczą wysokie plony ryżu czy też trzciny cukrowej, które przy odpowiednim nawożeniu krzemionką są często o ponad 50% wyższe niż w kontroli [2, 16, 29, 30, 33 i inni]. Ponadto obecność krzemionki w ścianach komórkowych roślin utrudnia wnikanie patogenów do tkanek roślinnych [3, 12, 18 i inni].

Krzemionka stymuluje i zapobiega toksycznemu działaniu takich pierwiastków w roślinach, jak mangan, żelazo, glin, cynk i inne występujące w większych stężeniach w glebach [7, 8, 13, 14, 15, 20, 21, 24, 27, 29]. Stwierdzono doświadczalnie, że stężenie Mn powyżej 5 mg w 100 g gleby bez obecności krzemionki obniża plon fasoli o 50–60% [20]. Podobne działanie Mn stwierdzono w wypadku jęczmienia, ryżu i innych roślin. Brak krzemionki przy większych stężeniach Mn w glebach wywołuje nekrotyczne plamy na liściach roślin powodowane nierównomiernym rozmieszczeniem Mn w miejscach jego nadmiernego nagromadzenia i utlenianiem polifenoli. Zagadnienie to nie zostało jeszcze całkowicie wyjaśnione [20]. Podobnie krzemionka wywołuje wzrost tolerancji u roślin na glin ruchomy w glebie i inne pierwiastki [13, 14, 15, 21, 22]. Natomiast dodatek krzemionki do gleb o małej zasobności w fosfor powoduje uwalnianie z gleby fosforu niedostępnego dla roślin i dobre zaopatrywanie ich w ten składnik [28, 29]. Uwalnianie fosforanów pod wpływem nawożenia krzemionką ma miejsce w glebach obszarów suchych, nie podmokłych. Natomiast w glebach podmokłych oraz na polach ryżowych zjawisko uwalniania fosforanów nie występuje. Sprawa ta wymaga dalszych badań. Stwierdzono, że u pszenicy dodatek krzemionki stymuluje i przyspiesza wschody, szczególnie jest to widoczne na glebach zasolonych. Szczególne działanie krzemionki obserwuje się u większości roślin uprawianych na glebach słonych [1, 9, 26].

Ponadto stwierdzono, że rośliny pobierające większe ilości krzemionki z gleby zmniejszają współczynnik ewapotranspiracji. Są to na przykład: ryż, trzcina cukrowa, skrzyp, pszenica. Ryż przy nawożeniu krzemionką wykazuje od 12 do 15% mniejszą ewapotranspirację, pszenica około 10%. Rośliny, które nie akumulują krzemionki, jak np. soja, nie wykazują efektu zmniejszenia ewapotranspiracji.

Krzemionka gromadzona w ścianach komórkowych roślin zwiększa możliwości syntezy lignin przy znacznie mniejszym nakładzie energii. Bez krzemionki rośliny

na zużywa na produkcję 1 grama ligniny aż 2 gramy glukozy. Natomiast w obecności krzemionki 1 gram glukozy pozwala na produkcję 20 gramów ligniny. Stwierdzono, że krzemionka uaktywnia działanie ADP i ATP szczególnie w trzcinie cukrowej [4, 16, 22].

Krzemionka spełnia ogromną rolę w fizjologii roślin i zwierząt. Nie wszystkie jednak aspekty fizjologicznej roli krzemionki w organizmach roślinnych i zwierzęcych zostały wyjaśnione.

W związku z tym nasuwa się pytanie: czy nawozić krzemionką rośliny zbożowe i warzywne oraz krzewy owocowe i rośliny jagodowe? Doświadczeń w tym zakresie w literaturze polskiej praktycznie nie spotykamy. Technika nawożenia nawozami krzemionkowymi rozwinęła się głównie w krajach Azji wschodniej, a szczególnie w Japonii i Korei. Nawożenia wymagają głównie uprawy ryżu, które w obecności krzemionki utrzymują na sztywnej słomie kłosa nad wodą.

Może nasuwać się pytanie, czy w Polsce nawożenie krzemionką może mieć sens. Śladowe ilości krzemionki amorficznej koloidalnej zazwyczaj występują w naszych glebach. Wydaje się więc, że należałoby sprawdzić działanie krzemionki na wzrost i rozwój roślin warzywnych. Złóża skał krzemionkowych występujące w Polsce mogą zapewnić surowiec do produkcji nawozów krzemionkowych. Można również opracować technologię dodatku krzemionki do nawozów mineralnych azotowych, fosforowych lub potasowych. Być może dodatek krzemionki do nawozów fosforowych uaktywniłby rozpuszczalność i dostępność fosforu dla roślin.

Literatura

- [1] Ahmad R., Zaheer S.H., Ismail S. 1992. Role of silicon in salt tolerance of wheat (*Triticum aestivum* L). *Plant Sci.* 85: 43–50.
- [2] Anderson D.L., Snyder G.H., Martin F.G. 1991. Multi-year response of sugarcane to calcium silicate slag on Everglades Histosols. *Agronomy J.* 83: 870–874.
- [3] Belanger R.R., Boven P.A., Ehret D.L., Manzi J.G. 1995. Soluble silicon, its role in crop and disease management of greenhouse crops. *Plant Disease* 79: 324–336.
- [4] Bendz G., Lindquist J. 1977. Biochemistry of silicon and related problems. New York. Plenum. 591 pp.
- [5] Birchall J.D. 1995. The essentiality of silicon in biology. *Chem. Soc. Rev.* 24: 351–357.
- [6] Blaich R., Grundhöfer H. 1998. Silicate incrusts induced by powdery mildew in cell walls of different plant species. *Z. Pflanzener. Pflanzenschutz* 105: 114–120.
- [7] Baylis A.D., Gragopoulou C., Dawidson K.J., Birchall J.D. 1994. Effect of silicon on the toxicity of aluminium to soybean. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 25: 537–546.
- [8] Barcelo J., Guevara P., Poschenrieder C. 1993. Silicon amelioration of aluminium toxicity in teosinte, *Zea mays* L. *Plant Soil* 154: 249–255.
- [9] Bradbury M., Ahmad R. 1990. The effect of silicon on the growth of *Prosopis juliflora* growing in saline soil. *Plant Soil* 125: 71–74.

- [10] Carver T.L.W., Robbins Mr., Thomas B.J., Troth K., Raistrick N., Zeyen R.J. 1998. Silicon deprivation enhances local antofluorescent responses and phenylamine ammonia-lyase activity in oat attacked by *Blumeria graminis*. *Physiol. Mol. Plant Pathology* 52: 245–257.
- [11] Chen C.-H., Lewin J. 1969. Silicon as a nutrient element for *Equisetum arvense*. *Canadian J. Botany* 47: 125–131.
- [12] Cherif M., Asselin A., Belanger R.R. 1994. Defense responses induced by soluble silicon in cucumber roots infected by *Pythium* spp. *Phytopatology* 84: 236–242.
- [13] Cocker Kch., Ewans D.E., Hodson M.J. 1998. The amelioration of aluminium toxicity by silicon in white (*Triticum aestivum* L.); malate exudation as evidence for an in planta mechanism. *Planta* 204: 318–323.
- [14] Cocker K.M., Evans D.E., Hodson M.J. 1998. The amelioration of aluminium toxicity by silicon in higher plants: solution chemistry or an in planta mechanism. *Physiol. Plant.* 104: 608–614.
- [15] Corrales J., Poschenrieder C., Barcelo J. 1997. Influence of silicon pretreatment on aluminium toxicity in maize roots. *Plant Soil* 190: 203–209.
- [16] Elawad S.H., Gascho G.J., Street J.J. 1982. Response of sugarcane to silicate source and rate. I. Growth and yield. *Agron. J.* 74: 481–484.
- [17] Exley C., Birchall J.D. 1996. Silicic acid and the biological availability of aluminium. *Europ. J. Soil Sci.* 47: 137.
- [18] Fawe A., Menzies J.G., Belanger R.R. 1999. Soluble silicon; a possible positive modulator of plant disease resistance. In print.
- [19] Hammond K.E., Evans D.E., Hodson M.J. 1995. Aluminium, silicon interactions in barley (*Hordeum vulgare* L.) seedlings. *Plant Soil* 173: 89–95.
- [20] Horst W.J., Marschner H. 1978. Effect of silicon on manganese tolerance of bean plants (*Phaseolus vulgaris* L.) *Plant Soil* 50: 287–304.
- [21] Hodson M.J., Evans D.E. 1995. Aluminium / silicon interactions in higher plants. *J. Exp. Bot.* 46: 161–171.
- [22] Hodson M.J., Sangster A.G. 1984. Observations on the distribution of mineral elements in the leaf of wheat (*Triticum aestivum*) with particular reference to silicon. *Ann. Botany* 62: 463–471.
- [23] Jarvis S.C. 1987. The uptake and transport of silicon by perennial ryegrass and wheat. *Plant Soil* 97: 429–437.
- [24] Jarvis S.C., Jones L.H.P. 1987. The absorption and transport of manganese by perennial ryegrass and white clover as affected by silicon. *Plant Soil* 99: 231–240.
- [25] Jones L.H.P., Handreck K.A. 1967. Silica in soils, plants, and animals. *Adv. Agron.* 19: 107–149.
- [26] Liang Y., Shen Q., Shen Z., Ma T. 1996. Effect of silicon on salinity tolerance of two barley cultivars. *J. Plant Nutr.* 19: 173–183.
- [27] Ma J.F., Sasaki M., Matsumoto H. 1997. Al – induced inhibition of root elongation in corn (*Zea mays* L.) is overcome by Si addition. *Plant Soil* 188: 171–176.
- [28] Ma J., Takahashi E. 1991. Effect of silicate on phosphate availability for rice in a P-deficient soil. *Plant Soil* 133: 151–155.
- [29] Prianisznikow D.N. 1936. *Agrochemia*. II wydanie Selhozgiz. Moskwa s. 494.

- [30] Sawant N.K., Snyder G.H., Datnoff L.E. 1997. Silicon management and sustainable rice production. *Adv. Agronomy* 58: 151–199.
- [31] Takahashi E., Miyake J. 1976. Distribution of silica accumulator plants in the plant kingdom (1) Monocotyledons. *J. Sci. Soil Manure* 47: 296–300.
- [32] Williams D.E., Vlamis J. 1957. The effect of silicon on yield and manganese – 54 uptake and distribution in the leaves of barley plants grown in culture solutions. *Plant Physiol.* 32: 404–409.
- [33] Yoshido S., Ohuishi Y., Kitagish K. 1966. Chemical forms, mobility and deposition of silicon in rice plant. *Soil Sci. Plant Nutr.* 8: 107–113.
- [34] Woolley J.T. 1957. Sodium and silicon as nutrients for the tomato plant. *Plant Physiol.* 32: 317–321.

Silicon in soil and its role in plant nutrition

Key words: silicon, silicon dioxide, minerals, silicon uptake by plants, silikon interaction with aluminium, phosphorus, heavy metals

Summary

Silicon is present in plants in the amounts equivalent to those of macronutrient elements such as calcium, magnesium, phosphorus, nitrogen etc.. Higher plants differ in their capacity of silicon uptake. Its content in plants (as SiO₂) varies from 0,1 to 15,0% dry matter. Silicon is the element protecting against insects and pathogens, against toxicity of Mn, Fe, Al and other metals (also heavy metals) and salinity of the soils. Most sensitive plants to silicon are: field horsetail, rice, sugarcane and some cereal species. Those plants strongly respond to silicon supply. Lack of the silicon reduces drastically crop yields, even by 50%.

*Adres do korespondencji:
prof. dr hab. Zygmunt Brogowski
Zakład Gleboznawstwa
Katedra Nauk o Środowisku Glebowym
Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego
ul. Rakowiecka 26/30
02-528 Warszawa*