

Vloga silicijevih spojin v živih organizmih

The role of silicon compounds in living organisms

Martina Hrast, Aleš Obreza

Povzetek: Za rastline je silicij esencialni element, saj njegovo pomanjkanje povzroči šibkejšo strukturo rastlinskih organov in poveča verjetnost za nepravilno rast, razvoj in reprodukcijo rastlin. Silicijeve spojine povečajo odpornost rastlin proti boleznim, ki jih povzročajo glive, bakterije in drugi škodljivci, zmanjšajo toksičnost nekaterih kovinskih ionov in povečajo toleranco za slanost prsti. V živalskem in človeškem telesu vloga silicija še ni popolnoma razjasnjena. Dokazali so, da silicij vpliva na kalcifikacijo kosti in razvoj skeleta. Pomembno vlogo ima v osteogenih celic, zavira resorpcijo kosti ter vpliva na celjenje poškodb v telesu. Dandanes poteka veliko raziskav o uporabi silicija pri terapiji osteoporoze in Alzheimerjeve bolezni. O peroralni toksičnosti silicija je malo podatkov, medtem ko že dolgo vemo, da vdihavanje silicijevega dioksida povzroči azbestozo ali silikozo. Glede na dnevne potrebe silicijevih spojin je vnos s hrano dovolj velik, zato dodatno vnašanje le-teh nima racionalne osnove.

Ključne besede: silicij, esencialni element, kalcifikacija kosti, toksičnost

Abstract: Silicon has essential role in plant growth and reproduction by alleviating both biotic and abiotic stresses including diseases, pests, heavy metal toxicity and salinity of soil. Silicon in animal and human connective tissue also plays an important role. It has a physiological role in bone calcification process, and in development of skeleton. Silicon inhibits resorption of bone, affects the healing of injuries and is a major ion of osteogenic cells. Intensive research into the use of silicon in osteoporosis and Alzheimer's disease has therefore been carried out in recent years. Few data are available on the oral toxicity of silicon, meanwhile it is known for decades that inhalation of silica causes silicosis or asbestosis. Supplementation of silicon is not needed because the daily dietary intake of silicon with food is sufficient.

Key words: silicon, essential element, bone calcification, toxicity

1 Uvod

Pričujoči prispevek nadaljuje serijo člankov o esencialnih elementih, objavljenih v Farmacevtskem vestniku (1–3). Ime elementa izhaja iz latinske besede *silex*, kar pomeni kremen. Elementni silicij je leta 1824 z redukcijo silicijevega tetrafluorida s kalijem pripravil švedski kemik Jöns Jacob Berzelius. Silicij je drugi najbolj razširjen element v naravi, takoj za kisikom, nahaja se tudi v soncu, zvezdah in je glavna sestavina meteoritov, znanih pod imenom aeroliti. V zemeljski skorji ga je okoli 26 %. Elementni silicij v naravi ni prisoten, saj ima zelo veliko afiniteto do kisika, pri čemer nastanejo silicijev dioksid in silikati. V vodi se lahko zelo majhna količina SiO_2 raztopi in tvori silicijevo(IV) kislino (ortosilicijeva kislina, H_4SiO_4), ki je biološko uporabna. Le-ta je obstojna pri pH nižjem od 9 in pri koncentraciji nižji od 2 mM. Pri višjih koncentracijah poteče spontana polikondenzacija (4, 5).

Silicijev dioksid in silikati so zelo široko uporabni na najrazličnejših področjih, tudi v farmaciji. Med najpomembnejše silikate spadata kalijev glinenec ali ortoklaz, $(\text{K}(\text{AlSi}_3\text{O}_8))$, ki sestavlja granit, gnajs in porfir, ter kaolinit $(\text{Al}_2(\text{Si}_2\text{O}_5)(\text{OH})_4)$, ki je sestavni del gline. SiO_2 je prav tako sestavni del granita, gnajsa in kremenovega peska. Kremen je najpomembnejši vir za pripravo silicija in njegovih spojin. Silikati so

prisotni v steklu, keramiki in cementu, silikoni sestavljajo tehnično zelo uporabne materiale, kot so olja, maziva in plastične mase, poleg tega pa se silicijeve spojine uporabljajo v elektronski industriji kot polprevodniki (4, 5).

2 Silicij v rastlinah

Silicij je izredno pomemben esencialni element za rastline, saj njegovo pomanjkanje povzroči šibkejšo strukturo rastlinskih organov in poveča verjetnost za nepravilno rast, razvoj in reprodukcijo rastlin. V rastlinah je njegova koncentracija zelo različna in se giblje med 0,1 in 10 % suhe teže. Na podlagi tega lahko sklepamo, da obstaja več mehanizmov privzema in transporta silicija v rastlinah. Silicij se v zemlji nahaja v obliki silicijeve(IV) kisline, ki jo rastline črpajo s pasivnim transportom. Privzem H_4SiO_4 lahko poteka tudi z aktivnim transportom, preko prenašalca Lsi1. Po privzemu silicijeve(IV) kisline v rastlino, se v njej v vodnih pogojih tvorijo silicijevi polimeri – silikati. Na polimerizacijo vplivajo koncentracija silicijeve kisline, temperatura, pH in prisotnost ostalih ionov, nizkomolekularnih organskih molekul in polimerov. V vseh primerih nastanejo polimeri s siloksansko vezjo Si-O-Si. Polimeri se razlikujejo v strukturi in fizikalno-kemičnih lastnostih,

kot so npr. gostota, topnost, viskoznost. Ti polimeri se nato vgradijo v celično steno, lumen določenih celic, medcelični prostor in pod kutikularni sloj (6).

Silicij zveča odpornost rastlin proti boleznim, ki jih povzročajo glive ali bakterije in zatira bolezni, ki jih povzročajo insekti in drugi škodljivci. Za tako delovanje naj bi bila odgovorna dva mehanizma. Silicijeve spojine so naložene pod kutikulo in tvorijo dvojno plast, ki deluje kot mehanska ovira, ki prepreči penetracijo gliv. Poleg tega polimere silicija nahajamo tudi v celični steni, kjer tvorijo mehansko bariero, ki oteži insektom žvečenje listov in žuželkam, da z bodalom prodrejo skozi rastlinsko tkivo (7). Drugi mehanizem so odkrili pred kratkim, saj so pri rastlinah, ki so jim v gnojilo dodajali silicijeve spojine, opazili zvečano aktivnost hitinaz, peroksidaz, polifenol-oksidad in flavonoida fitoaleksina, ki naj bi delovali protiglivično.

Silicij v rastlinah zmanjša toksičnost kovinskih ionov, kot so Mn^{2+} , Cd^{2+} , Al^{3+} in Zn^{2+} . Povzroči bolj enakomerno razporeditev Mn^{2+} v rastlinskem tkivu in zmanjša koncentracijo raztopljenih manganovih soli, tako da zveča adsorpcijo Mn^{2+} na celično steno. Signifikantno zmanjša lipidno peroksidacijo membrane, ki jo povzročajo Mn^{2+} ioni, in ojača delovanje encimskih (preko SOD) in neencimskih (askorbat, glutation) antioksidantov. Silicij z aluminijevimi ioni tvori slabo topen aluminijev silikat oziroma hidroksialuminijev silikat in na ta način zmanjša koncentracijo toksičnih Al^{3+} . Prav tako poveča nastajanje fenolnih spojin, ki lahko tvorijo kelate z Al^{3+} ioni. Silicij zmanjša tudi toksičnost Cd^{2+} . Natrijev metasilikat (polimerni Na_2SiO_3) in druge silicij vsebujoče spojine zvišajo pH prsti in tako zmanjšajo privzem Cd^{2+} v rastline. Silicij tvori s Zn^{2+} netopne silikate in s tem zmanjša njihovo delovanje (8).

Silicij poveča toleranco rastlin za slanost v okolju po več mehanizmih. Najprej zmanjša izparevanje vode iz listov, kar zmanjša osmotski stres. V koreninah zveča aktivnost H^+ -ATPaze in H^+ -fosfataze ter tako zveča privzem in transport K^+ in zmanjša privzem in transport Na^+ iz korenin do listov. Dodajanje silicija zmanjša permeabilnost plazemske membrane celic listov in izboljša strukturo kloroplastov, ki jih prekomerna količina NaCl zelo poškoduje. Silicij zveča aktivnost superoksid-dismutaze, peroksidaze, katalaze in glutation-reduktaze in koncentracijo glutationa v koreninah in listih ter zmanjša koncentracijo malonilaldehida. S tem naj bi vplival na strukturo, integriteto in funkcijo plazemske membrane preko zmanjševanja lipidne peroksidacije membran (8).

3 Silicij v živalskem telesu

Že od leta 1970 potekajo intenzivne raziskave o pomenu silicija pri živalih. Prve raziskave na podganah in miših so pokazale, da se silicij nahaja pretežno v tistih delih kosti, kjer poteka aktivna mineralizacija, medtem ko je pri zrelejših kosteh, kjer koncentracija kalcija naraste zaradi večje vsebnosti hidroksiapatita, njegova vsebnost nižja. Na podlagi tega so prišli do zaključka, da silicij vpliva na zgodnjo fazo kalcifikacije kosti (9).

V nadaljnjih raziskavah so ugotavljali spremembe pri živalih (podganah in piščancih), ki so jih hranili s hrano, v kateri je primanjkovalo silicija. Pri obeh vrstah so opazili relativno atrofijo vseh organov, koža in sluznice pa so bile rahlo anemične. Razvoj skeleta je bil zavrt, prav tako je bila manjša lobanja, ki je imela tudi zgradbo

matriksa izrazito drugačno (10). Pomanjkanje silicija je vplivalo tudi na sklepe, ki so bili manjši in so vsebovali manj sklepnega hrustanca. Sklepni hrustanec je imel signifikantno nižjo vsebnost heksozaminov, kar jasno kaže na vlogo silicija pri tvorbi glikozaminoglikana v hrustancu (11, 12).

V eni od raziskav, kjer so teličkom v pitno vodo dodajali silicijevo(IV) kislino, so ugotovili značilno zvečano koncentracijo kolagena in hidroksiprolina v dermisu in opazili pozitivno korelacijo med serumsko koncentracijo silicija in koncentracijo hidroksiprolina v hrustancu (13). Z rentgensko analizo mladih kosti, ki so v fazi aktivne rasti, so ugotovili, da je silicij, poleg kalcija, fosforja in magnezija, glavni ion osteogenih celic. Vsebnost silicija je bila zelo visoka predvsem v osteoblastih, kjer se silicij nahaja v mitohondrijih (12, 14).

Na podlagi nekaterih raziskav predvidevajo, da silicij zavira resorpcijo kosti. Preučevali so učinek monometiltrisilanola na trabekularne kosti pri podganah, ki so jim odstranili jajčnike. Ugotovili so, da se zveča površina, ki jo na kosti prekrivajo osteoblasti in mineralizacija metafiznega dela trabekularnih kosti, poleg tega pa se zmanjša število osteoklastov in površina kosti, ki jo zasedajo. To je povzročilo večji volumen trabekularne kosti pri ovariektomiranih podganah v primerjavi z zdravimi. Ovariektomiranim podganam so dodajali tudi natrijev metasilikat, pri čemer so ugotovili, da je izguba kostne gostote manjša, poleg tega se zveča longitudinalni razvoj stegenice v primerjavi z zdravimi živalmi (15).

V kasnejših raziskavah so dokazali, da pomanjkanje silicija vpliva na celjenje poškodb v telesu. Pomanjkanje silicija podaljša čas tvorbe kolagena na poškodovanem delu in zmanjša aktivnost jetrne ornitin-aminotransferaze, ki pretvarja ornitin v prolin, ki je glavni prekurzor sinteze kolagena. Poleg tega so ugotovili, da pomanjkanje silicija zmanjša koncentracijo eozinofilcev, ki sproščajo citokine, ki vplivajo na celjenje rane, in zmanjša koncentracijo bakra v kosteh, za katerega vemo, da vpliva na prečno povezovanje kolagena v kosteh (16).

4 Silicij v človeku

Silicij je relativno pogost v človeškem telesu, po masi ga je nekoliko manj kot železa in cinka ter več kot mangana in bakra. Najvišja koncentracija silicija je v vezivnem in kostnem tkivu, med organi pa v aorti, trahejah, kitah in koži, saj se veže na glikozaminoglikan in proteine v vezivnem tkivu. V manjši koncentraciji ga najdemo v parenhimskem tkivu organov, kot so jetra, srce, mišice in pljuča, v krvi pa se nahaja v obliki silicijeve(IV) kisline (15).

Predvidene dnevne potrebe (esencialnost ni dokazana) po siliciju znašajo 10 – 25 mg, z normalno hrano ga dobimo 20-50 mg/dan. 20 % dnevnega odmerka zaužijemo že s pitno vodo, ostalo pa pridobimo s hrano. Največ silicija vsebuje hrana, bogata z žitaricami (oves, ječmen, riževi in pšenični otrobi), vendar ga je veliko tudi v bananah, rozinah, fižolu, korenju, sladkorni pesi in leči, medtem ko ga je v mesni hrani manj. Med pijačami je pogost zlasti v pivu, kjer je njegov vir ječmenov slad (17). Iz predstavljenih števil lahko razberemo, da ne glede na morebitno esencialnost silicija, le-tega ni potrebno posebej dodajati, saj potrebne količine njegovih spojin zaužijemo s prehrano.

Na biološko uporabnost silicija vpliva več faktorjev. Le-ta je odvisna od tipa hrane, sestave hrane, prisotnosti vlaknin in kemizma prisotnih

silicijevih spojin. Vlaknine zmanjšajo absorpcijo številnih mineralov, med katere spada tudi silicij. Na absorpcijo Si vplivajo kationi, saj so v raziskavah na podganah ugotovili, da velika vsebnost kalcija v hrani zmanjša absorpcijo silicija. Na podlagi teh raziskav predlagajo dva možna mehanizma interakcij. Možno je, da imata silicij in kalcij enako pot absorpcije ali pa kalcij tvori s silicijem netopen kalcijev silikat, kar zmanjša biološko uporabnost silicija. Bolj verjeten je drugi mehanizem, saj tudi magnezij tvori s silicijem netopne silikate. Magnezij ima pomembno vlogo pri presnovi silicija, saj je magnezijev ortosilikat njegova najpomembnejša oblika v urinu, v taki obliki pa se nahaja tudi plazmi. Nekateri raziskovalci predvidevajo, da metabolizem silicija uravnavajo steroidni in ščitnični hormoni, ker naj bi njihova manjša koncentracija in aktivnost ščitnice v starosti zmanjšala njegovo absorpcijo (18).

Absorpcija silicija je zelo odvisna od kemijske oblike, v kateri se nahaja v živilih. Najlažje se absorbira v obliki silicijeve(IV) kisline, ki se nahaja v vodi, mleku in pivu. Slabša je absorpcija v obliki polimerov, ki so pogosto prisotni v hrani rastlinskega izvora, saj mora v gastrointestinalnem traktu najprej poteči hidroliza polimerov do silicijeve(IV) kisline (19). Iz vode in piva se absorbira najmanj 50 % H_4SiO_4 , medtem ko se iz rastlinske hrane po hidrolizi v povprečju absorbira 40 %. Mehanizem absorpcije silicija na nivoju molekul še ni poznan, vendar predvidevajo, da absorpcija poteka v proksimalnem delu tankega črevesa, kjer prevladuje aktivni transport, saj se ortosilicijeva kislina hitro in dobro absorbira. Nekateri tudi predpostavljajo, da se lahko H_4SiO_4 transportira paracelularno ali preko majhnih por transcelularno (15). Plazemske koncentracije se znatno zvečajo 100–120 minut po zaužitju hrane s silicijem. Silicij se ne veže na plazemske proteine, ampak je v krvi prisoten v obliki silicijeve(IV) kisline, ki lahko prosto prehaja v eritrocite in v okoliška tkiva. Poleg proste kisline je silicij prisoten tudi v obliki silikatov, kot sta magnezijev in kalcijev silikat. Silicij se hitro izloča skozi ledvica z glomerularno filtracijo in se izloči iz organizma v 4–8 urah po zaužitju. Majhen del se ga izloči tudi z blatom. V tubulih se le v manjši meri reabsorbira, zato je njegova koncentracija v urinu dober pokazatelj absorpcije iz gastrointestinalnega trakta (15, 18, 20).

Referenčne vrednosti za silicij v serumu se pri moških in ženskah signifikantno razlikujejo, na vrednost pa zelo vpliva starost. Pri moških, starih od 18–59 let, referenčna vrednost znaša 9,7–10,17 $\mu\text{mol/L}$, medtem ko pri ženskah, starih od 18–44 let, ta znaša 10,0–11,1 $\mu\text{mol/L}$. S starostjo se serumska koncentracija silicija zniža in pri ženskah, starih nad 74 let, znaša 8,0 $\mu\text{mol/L}$, pri moških enake starosti pa 7,7 $\mu\text{mol/L}$ (21).

Raziskav o vplivu silicija na človeško telo je malo. V eni prvih študij so ugotavljali vpliv Zeolita A, ki je kemijsko aluminijev silikat, na osteoblaste *in vitro*. Ugotovili so, da Zeolit A spodbudi proliferacijo in diferenciacijo osteoblastov in zavira resorpcijo kosti, povzročeno z osteoklasti. Zeolit A tudi zveča sproščanje transformirajočega ravnega faktorja $\beta 1$ (TGF- $\beta 1$), ki je citokin in stimulira nastajanje kolagena. Dokazali so, da imajo dojenčkov, ki so jih hranili le s parenteralno hrano, nižjo serumsko koncentracijo silicija, kar se je odražalo v manjši mineralni gostoti kosti v primerjavi z zdravimi dojenčki (22). Kasneje so dokazali, da koncentracije silicija v okviru referenčnih vrednosti stimulirajo sintezo kolagena tipa 1 v humanih osteoblastih in fibroblastih ter pospešijo diferenciacijo osteoblastov.

Točen mehanizem še ni poznan, vendar predvidevajo, da naj bi silicij deloval preko regulacije prolin-hidroksilaze, ki hidroksilira prolinske ostanke v kolagenu (23).

V dvojno slepi študiji so proučevali učinek s holinom stabilizirane silicijeve(IV) kisline (ch-OSA) na kožo, ki je postarana zaradi UV žarkov. Taka koža ima manj kolagena, glikozaminoglikana in proteoglikana. Prisotne so tudi poškodbe elastičnih vlaken, ki se kažejo kot hrapava usnjata površina kože z drobnimi ali globljimi gubami. Ženskam, starim med 40 in 65 let, so 20 tednov dodajali 10 mg Si/dan. Pri vseh preiskovankah so se izboljšale mehanske lastnosti kože in njena površina v primerjavi s kontrolno skupino, prav tako se je signifikantno zmanjšala krhkost las in nohtov. Na podlagi teh rezultatov predvidevajo, da dodajanje ch-OSA vpliva na regeneracijo ali *de novo* sintezo kolagenskih vlaken ter izboljša strukturo glikozaminoglikana v dermisu in strukturo keratina v laseh in nohtih (24).

5 Silicij in osteoporoza

Glede na prejšnje dokaze o vplivu silicija na rast kosti, so ugotavljali uporabo silicija pri osteoporozi in njegovem vplivu na mineralno kostno gostoto. Vemo, da je osteoporoza sistemska, degenerativna skeletna bolezen, za katero sta značilni nizka kostna masa in okvara mikrostrukture kostnega tkiva s posledičnim povečanjem kostne krhkosti in večjo občutljivostjo za zlom. Dognali so, da intravenska aplikacija silicija v obliki monometiltrisilanola zveča trabekularni volumen kosti, prav tako se zveča gostota stegenice po intramuskularni aplikaciji. V eni od epidemioloških študij so poročali o povezavi med vnosom silicija in kostno gostoto kolka pri moških in premenopavzalnih ženskah, pri čemer naj bi imel večji vnos silicija pomembno vlogo za zdravje kosti (22). Poleg tega so dokazali tudi, da zvečan vnos silicija pozitivno vpliva na mineralno kostno gostoto pri postmenopavzalnih ženskah, ki uporabljajo hormonsko nadomestno zdravljenje (25). Nedavno so dokazali, da uporaba s holinom stabilizirane silicijeve(IV) kisline (ch-OSA) pri osteopeničnih in osteoporotičnih pacientih zveča količino biokemičnega kazalca tvorbe kosti PINP (prokolagen tip I N-terminalni propeptid), ki je označevalec sinteze kolagena tipa I. Pri srednjih odmerkih ch-OSA (6 mg Si/dan) so opazili zvečano mineralno gostoto stegenice (18).

6 Toksičnost silicija

O peroralni toksičnosti silicija je zelo malo podatkov. Znano je le, da lahko pri dolgotrajni terapiji z antacidom magnezijevim trisilikatom nastanejo silicijevi kamni v ledvicah, sečniku in sečevodu (26).

Silicij oziroma silicijeve spojine pa so zelo nevarne, če jih vdihavamo. Tako poznamo dve bolezni, ki se pojavita kot posledici vdihavanja prahu azbesta ali silicijevega dioksida (kremenca).

Azbestni prah je sestavljen iz drobnih iglic (dolgih 10 do 100 in več μm in širokih 0,5 do 15 μm) in lahko pride v telo z inhalacijo. Pri vdihavanju prah prodre globoko v pljuča skozi alveolarne prostore do obeh rebrnih mren, kjer sproži vnetje. Tam ga alveolarni makrofagi fagocitirajo in obdajo s kislim mukopolisaharidnim slojem, pri čemer nastanejo azbestna telesca, ki jih lahko dokazujemo v sputumu. So prva opazna obrambna reakcija organizma na azbestna vlakna.

Latentna doba bolezni je dolga od 15-20 let od prve izpostavljenosti azbestnemu prahu. Azbestna telesa povzročijo proliferacijo vezivnega tkiva v alveolarnem intersticiju, ki sčasoma vodi v pljučno fibrozo, ki jo imenujemo azbestoza. Simptomi bolezni so stalni kašelj, dispneja in bolečine v prsih. V zelo napredovalem stadiju lahko pljučna fibroza privede do hude obremenitve desnega srca, ki v končni fazi lahko vodi v smrt.

Na toksičnost kremenčevega prahu vplivajo količina vdihanega kristaliničnega kremenca, velikost delcev in karakteristika površine delcev. Večjo toksičnost naj bi imel kremenčev prah, ki nastane pri drobljenju in brušenju kremenca. Silikoza je intersticijska pljučna bolezen, ki je lahko kronična, pospešena ali akutna. Kronična oblika bolezni se pojavi po 10 letih od vdihavanja prahu, medtem ko se pospešena pojavi že po 2 letih. Akutna silikoza se pojavi kot posledica zelo visoke izpostavitve kristalnemu silicijevemu dioksidu in se pojavi lahko že po nekaj mesecih od vdihavanja delcev. Pri vseh tipih azbestoze v pljučnem parenhimu nastanejo nodularne tvorbe, okoli katerih se nabirajo kolagenska vlakna, ki jih obkrožajo makrofagi. Temu sledi pljučna fibroza, ki uniči normalno pljučno funkcijo. V zgodnji fazi bolezni je prisotno samo kašljanje, ki mu sledi dispneja ob naporu in kri v sputumu (27).

Silicijev dioksid je mednarodna agencija za raziskave raka uvrstila v skupino znanih humanih karcinogenov. In vitro raziskave so pokazale da SiO_2 inhibira učinek superoksida dismutaze, kar naj bi povzročilo večje število radikalskih poškodb. Vdihan SiO_2 naj bi povzročil večji nastanek reaktivnih kisikovih spojin, ki poškodujejo DNA in zmanjšajo sposobnost obrambe celic. Kronično vdihavanje silicijevega dioksida lahko vodi do bolezni ledvic, ki se odražajo kot albuminurija in hipertenzija, pride pa tudi do sprememb v glomerulih in proksimalnih tubulih (26).

7 Silicij in aluminij

Aluminij je znan kot nevrotoksičen element. Ima aktivno vlogo pri nastanku lezij pri Alzheimerjevi bolezni in predvidevajo, da je vpleten v nastanek nevrofibrilarnih vozlov v možganih. Poleg tega je vezan v beta-amiloidih v možganih bolnikov s to boleznijo. Aluminij povzroča tudi apoptozo nevronov tako in vivo kot in vitro (28).

Silicij oziroma silicijeva kislina zmanjša biološko uporabnost aluminija, ker zmanjša njegovo absorpcijo iz gastrointestinalnega trakta in zveča sproščanje aluminija iz skladišč v telesu, vključno s kostmi, in njegovo izločanje iz telesa (29). Silicij zmanjša količino aluminija v možganih in tako zmanjša lipidno peroksidacijo v možganih. Na poskusih na miših so ugotovili, da imajo živali, ki so jim dodajali silicijevo kislino ali pivo, signifikantno nižjo koncentracijo aluminija v možganih. Učinkovitost silicija povezujejo z nastankom netoksičnega hidroksialuminijevega silikata. Tako nekateri znanstveniki predlagajo uvedbo silicija v terapijo Alzheimerjeve bolezni (28).

8 Sklep

Silicij uvrščamo med nujno potrebne elemente za rastline, saj njegovo pomanjkanje povzroči šibkejšo strukturo rastlinskih organov in poveča verjetnost za nepravilno rast, razvoj in reprodukcijo. Silicij zveča tudi odpornost rastlin na bolezni, ki jih povzročajo glive, bakterije, insekti

in ostali škodljivci ter zmanjša toksičnost kovinskih ionov in poveča toleranco rastlin na slanost v okolju. Njegova vloga pri živalih in ljudeh je še vedno predmet obsežnih raziskav. Dokazali so, da silicij vpliva na zgodnjo kalcifikacijo kosti in razvoj skeleta. Je eden glavnih ionov osteogenih celic, zavira resorpcijo kosti in vpliva na celjenje poškodb v telesu. Glede na dnevne potrebe silicijevih spojin je vnos s hrano dovolj velik, zato dodatno vnašanje le-teh nima racionalne osnove. Trenutno poteka kar nekaj raziskav o siliciju, zlasti na področju terapije osteoporoze in Alzheimerjeve bolezni, zato lahko v prihodnosti pričakujemo, da se bodo na tržišču pojavile tudi nekatere silicijeve spojine.

9 Literatura

1. Obreza A. Vanadij v živem organizmu in farmaciji. *Farm Vestn* 2003; 54: 713-718.
2. Obreza A. Terapevtski pomen anorganskih borovih spojin in njihova toksičnost. *Farm Vestn* 2004; 55: 463-468.
3. Obreza A. Molibden kot pomemben element v sledovih. *Farm Vest* 2008; 59: 16-20.
4. Lazarini F, Brenčič J. Splošna in anorganska kemija. DZS, 1984: 375-398.
5. Lide DR. *CRC Handbook of Chemistry and Physics, 89th Edition (Internet Version 2009)*, CRC Press/Taylor and Francis, Boca Raton, 2009; 4-33.
6. Currie HA, Perry CC. Silica in plants: biological, biochemical and chemical studies. *Ann Bot (Lond)* 2007; 100: 1383-1389.
7. Ma JF, Yamaji N. Functions and transport of silicon in plants. *Cell Mol Life Sci*. 2008; 65: 3049-3057.
8. Liang Y, Sun W, Zhu YG, Christie P. Mechanisms of silicon-mediated alleviation of abiotic stresses in higher plants: a review. *Environ Pollut*. 2007; 147: 422-428.
9. Carlisle EM. Silicon: a possible factor in bone calcification. *Science* 1970; 167: 279-280.
10. Carlisle EM. Silicon: an essential element for the chick. *Science* 1972; 178: 619-621.
11. Carlisle EM. Biochemical and morphological changes associated with long bone abnormalities in silicon deficiency. *J Nutr* 1980; 110: 1046-1056.
12. Carlisle EM. The nutritional essentiality of silicon. *Nutr Rev* 1982; 40: 193-198.
13. Calomme MR, Vanden Berghe DA. Supplementation of calves with stabilized orthosilicic acid. Effect on the Si, Ca, Mg, and P concentrations in serum and the collagen concentration in skin and cartilage. *Biol Trace Elem Res*. 1997; 56: 153-165.
14. Carlisle EM. Silicon as a trace nutrient. *Sci Total Environ* 1988; 73: 95-106.
15. Sripanyakorn S, Jugdaohsingh R, Thompson RPH, Powell JJ. Dietary silicon and bone health. *British Nutrition Foundation* 2005; 30: 222-230.
16. Seaborn CD, Nielsen FH. Silicon deprivation decreases collagen formation in wounds and bone, and ornithine transaminase enzyme activity in liver. *Biol Trace Elem Res* 2002; 89: 251-261.
17. Dejneka W, Łukasiak J. Determination of total and bioavailable silicon in selected foodstuffs. *Food control* 2003; 14: 193-196.
18. Jugdaohsingh R. Silicon and bone health. *J Nutr Health Aging*. 2007; 11: 99-110.
19. Robberecht H, Van Cauwenbergh R, Van Vlaslaer V, Hermans N. Dietary silicon intake in Belgium: Sources, availability from foods, and human serum levels. *Sci Total Environ* 2009; 407: 4777-4782.
20. Jugdaohsingh R, Anderson SH, Tucker KL, Elliott H, Kiel DP, Thompson RP, Powell JJ. Dietary silicon intake and absorption. *Am J Clin Nutr*. 2002; 75: 887-893.
21. Bissé E, Epting T, Beil A, Lindinger G, Lang H, Wieland H. Reference values for serum silicon in adults. *Anal Biochem* 2005; 337: 130-135.
22. Spector TD, Calomme MR, Anderson SH, Clement G, Bevan L, Demeester N, Swaminathan R, Jugdaohsingh R, Berghe DA, Powell JJ. Choline-stabilized orthosilicic acid supplementation as an adjunct to calcium/vitamin D3 stimulates markers of bone formation in osteopenic females: a randomized, placebo-controlled trial. *BMC Musculoskelet Disord* 2008; 9: 85

23. Reffitt DM, Ogston N, Jugdaohsingh R, Cheung HF, Evans BA, Thompson RP, Powell JJ, Hampson GN. Orthosilicic acid stimulates collagen type 1 synthesis and osteoblastic differentiation in human osteoblast-like cells in vitro. *Bone* 2003; 32: 127-135.
24. Barel A, Calomme M, Timchenko A, De Paepe K, Demeester N, Rogiers V, Clarys P, Vanden Berghe D. Effect of oral intake of choline-stabilized orthosilicic acid on skin, nails and hair in women with photodamaged skin. *Arch Dermatol Res*. 2005 ; 297: 147-153.
25. Jugdaohsingh R, Tucker KL, Qiao N, Cupples LA, Kiel DP, Powell JJ. Dietary silicon intake is positively associated with bone mineral density in men and premenopausal women of the Framingham Offspring cohort. *J Bone Miner Res* 2004; 19: 297-307.
26. Minerals: silicon
27. Wagner GR. Asbestosis and silicosis. *Lancet*. 1997; 349: 1311-1315.
28. Gonzalez-Muñoz MJ, Meseguer I, Sanchez-Reus MI, Schultz A, Olivero R, Benedí J, Sánchez-Muniz FJ. Beer consumption reduces cerebral oxidation caused by aluminum toxicity by normalizing gene expression of tumor necrotic factor alpha and several antioxidant enzymes. *Food Chem Toxicol*. 2008; 46: 1111-1118.
29. Perry CC, Keeling-Tucker T. Aspects of the bioinorganic chemistry of silicon in conjunction with the biometals calcium, iron and aluminium. *J Inorg Biochem*. 1998; 69: 181-191.