

SILICIUM: ESSENTIEEL SPOORELEMENT VOOR DE MENS?

Belangrijk mineraal voor plant, dier en mens

Silicium als kiezel(zuur)preparaten is al eeuwen bekend. De bekende Franse bacterioloog Louis Pasteur vestigde in 1878 de aandacht op een mogelijke rol van silicium voor het organisme. Sinds de negentiende eeuw zijn er siliciumrijke kruidenpreparaten op de markt. In de twintigste eeuw is Silicea de merknaam voor kiezel(zuur), vooral in de Duitstalige landen.



In de reguliere geneeskunde was de aandacht voor 'silicium' (siliciumdioxide en silicaten) tot voor kort beperkt.

Zo meldt het Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives in 1973 over silicium: 'the available data on orally administered silica and silicates appear to substantiate the biological inertness of these compounds'. Of in andere woorden: silica (preparaten) hebben geen (biologisch) effect op de mens. De biologische werkelijkheid is echter anders.

dr. Henk-Maarten Laane,
arts

Veranderde voedselsamenstelling
De laatste 100.000 jaar is de mens (in biologische zin) amper veranderd.

Maar wel zijn voedsel! Zo bevatte het eten van onze verre voorouders veel meer orgaanvlees, beenmerg, kraakbeen, gevogelte, insecten, vis en planten, waardoor het rijk was aan velelei macro- en micronutriënten. Vergelijken met het huidige voedselpakket bestaat er een groot verschil in de hoeveelheid silicaten. Deze forse vermindering is allereerst het gevolg van de veranderde samenstelling van de voeding. Ook door de veranderde teelt, de fabrieksmatige productie en het kookproces wordt een groot deel van de silicaten geëlimineerd.

Heeft deze siliciumvermindering in ons voedsel consequenties voor de gezondheid van de mens en zo ja op welke wijze?

Algemene informatie over silicium

Silicium (chemisch symbool: Si; Engelse term: silicon) is na zuurstof het meest voorkomende element op aarde. De aardkorst bestaat voor 27,7% uit silicium. Dit is aanzienlijk meer dan koolstof, dat slechts voor 0,0018% deel uitmaakt van de aardkorst. Er bestaan een kleine 90.000 siliciumverbindingen met als meest voorkomende vorm siliciumdioxide (SiO_2 = silica), zoals zand, rots, kwarts en kristal. SiO_2 is de verbinding van silicium met zuurstof. Het is de anhydride (water-vrije) vorm van kiezelzuur. Gekoppeld

aan water ontstaan diverse vormen van kiezelzuur.

De zouten van kiezelzuur zijn silicaten (zoals deze in grote hoeveelheden voorkomen in kleisoorten, veldspaat etc.).

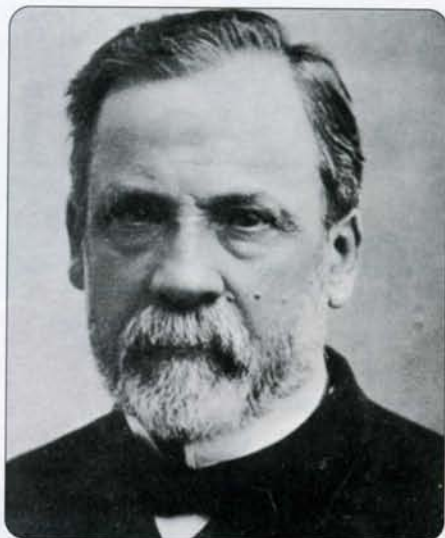
Silicaten hydrolyseren in een waterige omgeving tot kleinmoleculaire (= oligomere) vormen van kiezelzuur, waaronder het orthosiliciumzuur $[\text{Si}(\text{OH})_4]$ en het di- en trisiliciumzuur.

Naast de silicaten komen siliciden voor (verbindingen met tevens koolstof), silanolen (verbindingen van silicium met waterstof) en siliconen (polymeren van silicium met zuurstof).

Bio-availability: biologische opneembaarheid

Alleen de kleinmoleculaire (oligomere) vormen van kiezelzuur zijn biologisch opneembaar. Dit geldt voor plant, mens en dier. Vooral het orthosiliciumzuur (ook wel monosiliciumzuur genoemd) is biologisch goed opneembaar.

Zo toonden de Belgische onderzoekers Calomme et al (1988) aan dat van de diverse siliciumpreparaten alleen die met gestabiliseerd siliciumzuur goed opneembaar zijn. In een placebo-gecontroleerde studie bleek zelfs dat supplementen gebaseerd op silicagel (colloïd-kiezel) biologisch minder opneembaar waren dan een standaarddieet! Kruidenpreparaten met silicium gaven wel een geringe verhoging, terwijl het supplement met gestabiliseerd siliciumzuur de



Louis Pasteur (1822-1895)

silicium-bloedspiegel met een factor 3,5 deed verhogen ten opzichte van de standaardmaaltijd. Het woord gestabiliseerd geeft aan dat het siliciumzuur in kleinmoleculaire vorm in oplossing blijft. Dit is van belang omdat normaliter (oligomeer) kiezelzuur nogal instabiel is. Bij het stijgen van de concentratie treedt meteen ketenvorming op, polymerisatie, waarbij het polymeer kiezelzuur ($\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) ontstaat, dat vervolgens overgaat in een colloïd. En polymeer kiezelzuur is biologisch niet opneembaar.

Silicium en het plantenrijk

Silicium komt in aanzienlijke hoeveelheden voor in allerlei plantensoorten. De aandacht van de botanici voor silicium was en is nog steeds zeer gering door de nog steeds levende, maar onjuiste, veronderstelling dat silicium inert is. Dit is het gevolg van de stellige mening van wetenschappers uit het midden van de negentiende eeuw dat silicium geen rol speelt bij de plantengroei en dus 'niet essentieel' is. Hoewel er sindsdien verschillende (anekdotische) publicaties zijn verschenen over het belang van silicium voor veel plantensoorten, werd er tot voor zeer kort amper aandacht aan besteed.

Prof. Emanuel Epstein laat in een overzichtsartikel uit 1999 zien dat de rol en het belang van silicium veel gro-

ter zijn dan tot dan toe werd aangenomen. Sindsdien zijn er een drietal wereldcongressen gehouden over de rol van 'Silicon in agriculture'. Daar werd op overtuigende wijze aangetoond dat silicium allerminst inert is. Er zijn evidente biologische effecten op vele plantensoorten. Epstein noemt dit gebrek aan kennis over de biologische rol van silicium bij planten een ernstige omissie: *The plant biological community is still not aware that plants grown in media in the formulation in which silicon is not included are experimental artefacts: such minus-silicon plants do not exist in nature or agriculture or forestry* (Epstein & Bloom, 2004).

Een overtuigend voorbeeld van het belang van silicium voor het plantenrijk vormt het plankton. Hiertoe behoren de kiezelwieren, de diatomeeën, een klasse van eencellige wieren met een extern skelet van kiezel. De groei hangt af van de beschikbaarheid van voldoende kiezelzuur. Diatomeeën zijn verantwoordelijk voor de helft van de primaire voedselproductie van zeeën en oceanen en vormen een belangrijke bijdrage aan de zuurstofproductie van de wereld. Zonder silicium zou er amper of geen biologisch leven op aarde zijn!

Van de plantensoort Equisetum (een der eerste planten op aarde) is het hoge siliciumgehalte bekend. Hiertoe behoren onder andere heermoes (Equisetum arvense) en schaafstro (Equisetum hyemale). Een extract van deze planten is effectief tegen schimmels op planten en vruchtbomen, hetgeen al enkele eeuwen bekend is bij kwekers en tuinders. Dit effect is het gevolg van de opname van kiezelzuur door de bladeren en de vruchten. Ook brandnetels (Urticaceae) hebben een hoog siliciumgehalte, hetgeen voor een deel de genezende werking bij de mens verklaart. En zo worden ook aan allerlei andere planten geneeskrachtige eigenschappen toege-

schreven die voor een deel zijn te verklaren door de aanwezigheid van kleinere of grotere hoeveelheden kiezelzuur.

Hoewel sommige planten zonder silicium kunnen groeien, blijkt dat de groei verbetert bij de aanwezigheid van (opneembaar) silicium. Hierbij de kanttekening dat de lagere plantensoorten meer en makkelijker silicium opnemen dan hogere. Het lijkt wel alsof bij het voortschrijden van de evolutie de rol van silicium bij planten afneemt.

Bij plantensoorten als rijst, suikerriet en grassen maakt silicium tot meer dan 10% uit van het droog gewicht, dus meer dan de meeste andere macronutriënten.

Indien aan de bodem extra silicaten worden toegediend, blijkt de oogst toe te nemen.

Kiezelzuur verhoogt de afweer van planten. Er is meer weerstand tegen ziekten ('biotische stress') en tegen insecten en ongunstige klimaatomstandigheden, zoals droogte en hitte ('abiotische stress'). Het mechanisme hiervan werd tot kort geleden toegeschreven aan de vorming van een silicagel laag ('biogenic silica', $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) in de celwand van de bladeren, en dan vooral de epidermale cellen. Er vormt zich een 'siliciumpantser' dat de mechanische afweer van de plant verhoogt en de transpiratie van de bladeren vermindert. Thans blijkt uit vervolgonderzoek dat naast deze mechanische factor silicium ook de afweer van de plant verhoogt door activering van het immuunsysteem.

Deze positieve effecten van silicium zijn goed te zien bij toediening van extra silicaten. Er wordt dan meer siliciumzuur gevormd dat na actieve opname door de wortels via het vaatstelsel door de gehele plant wordt getransporteerd. Deze (extra) opname van kiezelzuur leidt tot:

- een toegenomen transport door

het xyleem (= houtvaatstelsel van de plant);

- een toegenomen K/Na-ratio;
- een toegenomen enzymactiviteit en;
- een verbeterde fotosynthese (Ahmad et al, 1992; Liang, 1999; Matichenkova et al, 2001).

Bij rijst en suikerriet is aangetoond dat silicium een te hoge opname van stoffen als mangaan, ijzer en aluminium doet verminderen (Datnoff 2005).

Silicium bij mens en dier: werkingsmechanismen

Net als in het plantenrijk werd ook bij mens en dier het belang van silicium tot voor kort genegeerd en zelfs ontkend. De beweerde effecten van kruidenpreparaten met silicium werden als alternatieve prietpraat afgedaan, ook al omdat er geen serieuze publicaties waren verschenen.

Het tijt keert als er in het begin van de jaren zeventig van de vorige eeuw enkele belangwekkende publicaties

verschijnen van Edith Carlisle en Klaus Schwarz.

Carlisle toont aan dat siliciumdeficiënt voer bij kuikens leidt tot allerlei afwijkingen en groeivertraging. Er worden aan zowel huid en huidgerelateerde structuren (kammen, veren) als aan bot en kraakbeen afwijkingen gevonden. Zo zijn er schedelafwijkingen en de botten van de poten zijn korter en dunner en breken sneller.

Identieke effecten worden gezien bij ratten met siliciumdeficiënte voeding. De onderzoekers schrijven dit toe aan een tweetal effecten. Er is zowel sprake van een verminderde collageenvorming als van een verminderde calcificatie (neerslaan van kalkzouten).

Ook tonen deze proeven aan dat er sprake is van een siliciumtekort, reden waarom silicium als essentieel element bij deze dieren moet worden beschouwd.

Uiteraard zijn dit soort proeven bij mensen om ethische redenen niet toegelaten, zodat het 'definitieve' bewijs dat silicium als essentieel voor de mens moet worden beschouwd, ontbreekt.

Toch zijn er thans steeds meer aanwijzingen dat dit wel het geval is, omdat er vanaf het midden van de jaren zeventig van de vorige eeuw talrijke publicaties over de effecten van silicium bij dier en mens zijn verschenen. Opvallend daarbij is dat er dan in de Franse literatuur al meerdere publicaties zijn verschenen, die (helaas) internationaal amper/geen aandacht hebben gekregen.

De werking van siliciumzuur

Silicium(zuur) heeft vooral een effect op bindweefsel. Bindweefsel wordt gevormd door fibroblasten, die zowel de vezels (collageen en elastine) maken als de grondsubstantie, de extracellulaire matrix.

De effecten van siliciumzuur zijn meervoudig:

1. effecten op de grondsubstantie;

2. effecten op andere mineralen;
3. effecten op cellen.

1. De effecten van siliciumzuur op de grondsubstantie

Orthosiliciumzuur is van belang voor de aanmaak van de grondsubstantie. Deze extracellulaire matrix bestaat uit:

- a. de vezelige fractie met onder andere collageenvezels;
- b. de grondsubstantie die is opgebouwd uit aminosuikers bevattende glycosaminoglycanen (GAGs), die vroeger mucopolysacchariden werden genoemd en waarin de vezels ingebed liggen. De fysieke staat van deze tussenstof varieert van bijna vloeibaar tot elastisch (zoals in kraakbeen) en hard (zoals in botweefsel).

Silicium speelt bij beide fracties een belangrijke rol.

1a. Silicium en collageen. Carlisle toonde in meerdere studies aan dat een siliciumdeficiënt dieet bij kuikens de oorzaak is van bot- en kraakbeenafwijkingen. Bij verdere analyse blijkt dat vooral de aanmaak van collageen is verminderd, terwijl ook de calcificatie afneemt. Haar conclusie is dat silicium vooral in de groeifase een belangrijke rol speelt in de botaanmaak. Behalve dat een siliciumtekort leidt tot een verminderde collageeraanmaak stimuleert extra silicium de collageenproductie. In een dubbelblind placebo-gecontroleerd onderzoek toonden Calomme et al (1997) bij kalveren aan dat bij suppletie van gestabiliseerd siliciumzuur het siliciumgehalte in het serum met 70% steeg. Dit had tot gevolg dat het collageengehalte in de dermis met 12,5% toenam. Ook was het collageengehalte van het kraakbeen significant toegenomen.

Ook bij paarden werd een soortgelijk effect gevonden. Zo melden Lang et al (2001) dat extra siliciumtoediening



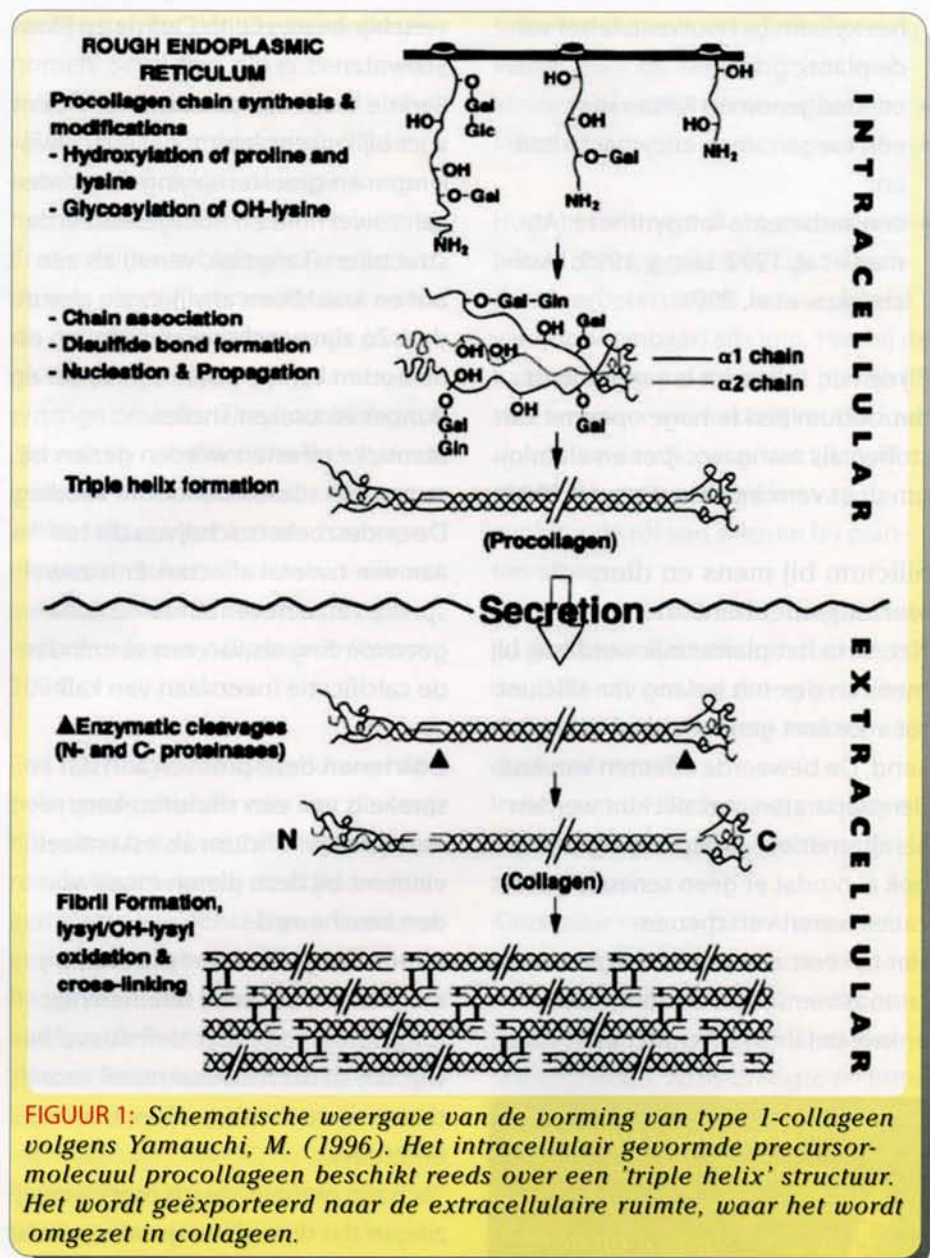
Heermoes (Equisetum arvense) behoort tot een van de eerste plantensoorten op aarde en staat bekend om het hoge siliciumgehalte.

leidt tot een hogere Si-concentratie in zowel het serum als in de melk. Tevens werd vastgesteld dat de blesuregevoeligheid van de paarden aanzienlijk afnam, wat werd toegeschreven aan sterker bot (grotere botmineraaldichtheid).

Saeborn en Nielsen (2002) tonen bij ratten aan dat siliciumdeficiënte voeding het collageengehalte in het botweefsel doet afnemen. Ook blijkt dat de wondgenezing negatief wordt beïnvloed door een siliciumtekort. Reffitt et al (2003) laten in experimenten in weefselweek zien dat orthosiliciumzuur de collageenproductie van verschillende typen cellen verhoogt.

Werkingsmechanisme. Siliciumzuur stimuleert de productie van collageen, waarvan er 19 typen bestaan. Een collageenvezel is opgebouwd uit fibrillen, die op hun beurt bestaan uit een helix van drie om elkaar gewonden eiwitketens (alfa-ketens), zoals in een touw (zie FIGUUR 1 voor een schematische weergave van de synthese van de 'triple helix'). Iedere alfa-keten is opgebouwd uit (ongeveer 1.400) aminozuren, vooral proline, hydroxyproline en glycine. Opvallend is dat het aminozuur hydroxyproline pas uit proline ontstaat nadat dit aminozuur in de eiwitketen is opgenomen. Deze reactie vereist onder andere vitamine C en wordt daarnaast gestuurd door siliciumafhankelijke enzymen (prolyl-hydroxylase). Daarnaast heeft silicium een structurele plaats in de onderlinge dwarsverbindingen van de collageenketens van de fibrillen.

Samenvattend kan worden gesteld dat collageenvorming wordt gestimuleerd door (extra) silicium en geremd door een siliciumtekort. Silicium is een structurele component in de dwarsverbindingen van collageenketens. Tot slot is silicium een cofactor voor de enzymen betrokken bij de vorming van het aminozuur hydroxyproline



FIGUUR 1: Schematische weergave van de vorming van type 1-collageen volgens Yamauchi, M. (1996). Het intracellulair gevormde precursor-molecuul procollageen beschikt reeds over een 'triple helix' structuur. Het wordt geëxporteerd naar de extracellulaire ruimte, waar het wordt omgezet in collageen.

(zoals prolyl-hydroxylase en ornithine-aminotransferase) in het collageeneiwit.

1b. Silicium en de extracellulaire matrix. Silicium wordt aangetroffen in de glycosaminoglycanen (GAGs), die vroeger mucopolysacchariden werden genoemd. Hyaluronzuur, chondroitinesulfaat en glucosamine maken hiervan deel uit. Silicium is aanwezig in de dwarsverbindingen tussen de polysaccharideketens van de GAGs en koppelt de GAGs aan hun respectievelijke eiwit. Door deze dwarsverbindingen ontstaat een driedimensionale structuur, waardoor het bindweefsel goed plooibaar wordt. Bij siliciumtekorten vermindert de

hoeveelheid GAGs, hetgeen consequenties heeft voor bot, kraakbeen en huid. Siliciumsuppletie daarentegen leidt tot een toename van de GAGs.

2. De relatie tussen siliciumzuur en andere mineralen

Silicium heeft interacties met diverse andere mineralen, zoals calcium, magnesium, boor, fosfaat, zink en koper. Bijna alle gegevens zijn van dierstudies afkomstig.

Emmerick et al (1990) toonden aan dat de toediening van extra silicium leidde tot een toename van koper en de kopergerelateerde effecten. Najda et al (1992) zagen ten aanzien van koper soortgelijke resultaten. Ook



Diatomeeën, eencellige wieren met een extern skelet van kiezel, zijn verantwoordelijk voor de helft van de primaire voedselproductie van zeeën en oceanen en vormen een belangrijke bijdrage aan de zuurstofproductie van de wereld.

zagen zij een hogere ijzerconcentratie door de toediening van extra silicium, terwijl het zinkgehalte daalde. Een jaar later vonden zij dat de toediening van extra metasilicaat leidt tot een daling van het magnesiumgehalte en een stijging van de calciumspiegel in het serum.

In het reeds eerder geciteerde artikel van Calomme et al (1997) blijkt dat de toediening van biologisch opneembaar (gestabiliseerd) siliciumzuur leidt tot een matige verhoging van fosfor (P) en magnesium (Mg). Belangrijker is de calciumtoename: deze verliep evenredig met de toegenomen siliciumconcentratie in het serum.

Seaborn en Nielsen toonden bij ratten aan dat siliciumdeficiënte voeding leidde tot een daling van mineralen in botweefsel, zoals calcium, koper, zink, kalium en fosfor.

McCrary (2003) toonde bij ratten aan dat siliciumsuppletie de calcium-, fosfor- en magnesiumconcentraties in de wervels en de schedel verhoogt.

Ook de relatie tussen silicium en aluminium is van belang. Silicium, in de vorm van vooral oligomeer siliciumzuur, doet de opname van aluminium verminderen. Verder wordt er bij inname van een hogere dosering van siliciumzuur een toegenomen uitscheiding van aluminium in de urine gezien. Dit komt ten dele doordat in

het lichaam aluminium wordt gebonden door silicium, waarna dit complex door de nieren wordt uitgescheiden. Hierdoor heeft silicium een ontgiftende werking op (de schadelijke effecten) van aluminium. Aluminium wordt verondersteld betrokken te zijn bij het ontstaan van de ziekte van Alzheimer, een aspect waarop in het tweede deel van dit artikel zal worden ingegaan.

3. De effecten van siliciumzuur op diverse typen cellen

Siliciumzuur stimuleert fibroblasten tot de productie van collageen. Eveneens worden osteoblasten (beenvormende cellen) gestimuleerd en osteoclasten (botvretende cellen) afgeremd. Deze werking op de botvorming wordt vooral gezien in de groeifase van botweefsel als het siliciumgehalte in de groeischijf van het bot de hoogste waarden bereikt. Na het sluiten van de groeischijf daalt het siliciumgehalte (Carlisle, 1980).

Daarnaast is er een effect van silicium op kraakbeen. Bij siliciumdeficiëntie treden bij kippen kraakbeenafwijkingen op, terwijl de toediening van extra silicium leidt tot een toename van gewrichtskraakbeen.

Silicium-metabolisme bij de mens

Opname

Alleen het oligomere siliciumzuur is biologisch opneembaar. Silicaten zijn

pas opneembaar na omzetting in oligomeer siliciumzuur. De opname is vooral bekend van orthosiliciumzuur. De opname door de darm is na twee uur voltooid met een gemiddelde van 55% (22–75%).

Distributie en metabolisme

Na opname wordt siliciumzuur door het hele lichaam verspreid. Hoge concentraties zijn te vinden in bindweefsel en de daarvan afgeleide weefsels, waaronder bot, kraakbeen, pezen, huid, haar, nagels, de aorta, grote arteriën, lymfatisch weefsel, lever, nier en longen. Siliciumzuur wordt in de moedermelk uitgescheiden.

Het menselijk lichaam bevat ongeveer 7 gram silicium, meer dan alle andere spoorelementen tezamen.

De hoeveelheden silicium in het bot variëren. In de wervelkolom is de hoogste concentratie te vinden in de lendenwervels, waar tweemaal meer silicium voorkomt dan in de cervicale wervels. Er is een correlatie tussen de hoeveelheid silicium en de biokinetiek van de wervelkolom (Yamada et al, 2003). Een zelfde effect was reeds beschreven bij apen waar de femur (dijbeen)schacht 43 ppm silicium bevat, terwijl de femurkop 456 ppm silicium bevat (LeVier, 1975).

Uitscheiding

De uitscheiding vindt via de nieren plaats volgens een eerste-orde proces van 2,7 uur en een tweede-orde proces van 11,3 uur (Poppellwell).

Het tweede en laatste deel van dit artikel kunt u lezen in 'De Orthomoleculaire Koerier' 119. Daarin zullen de klinisch-biologische effecten van silicium bij mens en dier worden beschreven. In deel 2 is ook de literatuurlijst opgenomen.