

juni 2006

rapport O1082

**Siliciumtoediening: effect
op beschikbaarheid van P,
droogtetolerantie, en
ziekteweerbaarheid op
gras- en maïsland**

dr. ir. D.W. Bussink
ing. T.A. van Dijk

nutriënten management instituut nmi bv
postbus 250
6700 ag wageningen
mariëndaal 8
6861 wn oosterbeek
tel. (0317) 46 77 00
fax (0317) 46 77 01
e-mail nmi@nmi-agro.nl
internet www.nmi-agro.nl

© 2006 Wageningen, Nutriënten Management Instituut NMI B.V.

Alle rechten voorbehouden. Niets uit de inhoud mag worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, op welke wijze dan ook, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de directie van Nutriënten Management Instituut NMI.

Rapporten van NMI dienen in eerste instantie ter informatie van de opdrachtgever. Over uitgebrachte rapporten, of delen daarvan, mag door de opdrachtgever slechts met vermelding van de naam van NMI worden gepubliceerd. Ieder ander gebruik (daaronder begrepen reclame-uitingen en integrale publicatie van uitgebrachte rapporten) is niet toegestaan zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van NMI.

Disclaimer

Nutriënten Management Instituut NMI stelt zich niet aansprakelijk voor eventuele schadelijke gevolgen voortvloeiend uit het gebruik van door of namens NMI verstrekte onderzoeksresultaten en/of adviezen.

Verspreiding

Inhoud

	pagina
Samenvatting en conclusies	2
1 Inleiding	6
1.1 Mogelijkheden van Silicium	6
1.2 Doel	6
1.3 Verwacht resultaat	6
2 Silicium in bodem	7
2.1 Silicium	7
2.2 Effect temperatuur, vocht, redoxpotentiaal, pH, kalk, klei en organische stof op Si in de bodem	8
2.3 Bepaling beschikbaar Si	9
3 Silicium in de plant	10
3.1 Silicium als voedingsstof voor planten	10
3.2 Opname en depositie van Si in de plant	11
3.3 Bepaling Si-gehalte plant	12
4 Resistentie tegen schimmels en ziekten	13
4.1 Werkingsmechanismen	13
4.2 Effecten bij grasachtigen	14
5 Benutting voedingsstoffen: P	18
5.1 Algemeen	18
5.2 Effect Si op P-opname door het gewas	20
5.2.1 Gerst en rijst	20
5.2.2 Gras	20
5.2.3 Maïs	21
5.3 Effect Si op Al- en Mn-opname door het gewas	22
6 Droogtetolerantie en efficiënt watergebruik	23
6.1 Algemeen	23
6.2 Rijst	24
6.3 Gras	24
6.4 Tarwe	26
6.5 Maïs	26
6.6 Zouttolerantie	27
7 Bemesting met Silicium	29
7.1 Reden voor bemesting	29
7.2 Effecten van bemesting	29
7.3 Meststoffen	30
8 Silicium in diervoeding	33
8.1 Silicium in het dier	33
8.2 De voeropname	33
9 Discussie	35
10 Literatuur	39

Samenvatting en conclusies

Hoewel silicium (Si), één van de basisbestanddelen van grond, geen direct effect op de groei van de plant heeft, wordt er wel een aantal indirecte positieve effecten op de gewasgroei gemeld. Het meest bekend zijn voorbeelden uit de rijst-, tarwe- en suikerrieteelt, maar ook bij de tuinbouw onder glas (komkommer). Naast een effect op de stevigheid van de plant wordt genoemd dat het bijdraagt aan een betere fosfaatbeschikbaarheid, droogtetolerantie en weerstand tegen ziekten. Dit zijn belangrijke aandachtspunten bij de teelt van gras en maïs, vooral nu de fosfaatbemesting verder terug moet en het streven is om zo efficiënt mogelijk om te gaan met water, zowel vanuit milieu oogpunt als vanuit de kosten gezien. Kroonroest is op grasland de meest serieuze bedreiging, waardoor de smakelijkheid van gras afneemt. Bovendien lijkt een lager stikstofgebruik de roestproblematiek te verergeren.

Via literatuuronderzoek is nagegaan in hoeverre de genoemde effecten van Si mogelijk ook van toepassing zijn op de teelt van gras en maïs. Daarbij is eerst gekeken naar factoren die van invloed zijn op de Si-beschikbaarheid. De hoeveelheid gegevens omtrent positieve effecten van Si voor de teelt van gras en maïs is beperkt. Daarom is ook gekeken naar andere grasrassen dan die in Nederland voorkomen of is gekeken naar grasachtigen zoals de granen.

Hoewel Si in grote hoeveelheden voorkomt in gronden is de beschikbaarheid maar laag. De Si-concentratie in de bodemoplossing bedraagt 3,5 tot 40 mg l⁻¹. De beschikbaarheid is in zijn algemeenheid het laagst op de zandgronden en het hoogst op de kleigronden. De beschikbaarheid wordt beïnvloed door temperatuur en vochtgehalte. Naarmate deze hoger zijn neemt de beschikbaarheid toe. Ook een lagere pH geeft een hogere Si-beschikbaarheid onder Nederlandse condities. Bekalken verlaagt de beschikbaarheid van Si, tenzij Si-houdende kalken worden gebruikt (Converterkalk, Hüttenkalk) die ontstaan bij de ijzerertsproductie. Het effect van organische stof op de Si-beschikbaarheid is niet duidelijk. De redoxpotentiaal is ook van invloed. Een lage redoxpotentiaal (zoals bij gronden die onder water staan) is gunstig voor de Si-beschikbaarheid. Deze situatie komt voor bij de natte rijsteelt. Resultaten verkregen met Si bij de teelt van rijst kunnen dus niet zonder meer vertaald worden naar de Nederlandse situatie.

De variatie in Si-gehalten van planten is groot. In klaver is deze in het algemeen laag (rond de 0,1 procent). In gras kan deze sterk variëren van enkele promillen tot enkele procenten. In granen kunnen enkele procenten Si aanwezig zijn. Over het Si-gehalte in gewassen is echter weinig Nederlandse informatie voorhanden.

Uit de beschikbare informatie blijkt dat Si een rol speelt bij de ziekteresistentie. De laatste jaren komt er ook meer informatie beschikbaar met betrekking tot gras en maïs. Bij Engels raaigras werd tot 25 procent minder aantasting gezien van grijze bladvlekkenziekte bij toediening van Si. Bij diverse andere (gazon)grassen gaf Si-toediening 17 – 78 procent minder aantasting door schimmels. Er is geen informatie beschikbaar in hoeverre kroonroest, de belangrijkste schimmelaantasting in gras, wordt onderdrukt door hogere Si-gehalten. Ook niet duidelijk is hoe hoog de Si-opname moet zijn voor een substantiële vermindering van de ziektegevoeligheid. Maïs is in vergelijking met gras betrekkelijk ongevoelig voor schimmelaantasting. Gegevens over Si en ziektedruk in maïs zijn er dan ook vrijwel niet.

In het algemeen leidt meer beschikbaar Si tot een hogere beschikbaarheid van fosfaat (P) in de grond,

vooral bij lage P-gehalten. Dit hoeft niet te betekenen dat de P-opname door het gewas hoger is. Veeleer leidt Si tot een betere translocatie van P in de plant. Dit zou veroorzaakt worden door een geringere opname van mangaan (Mn) en ijzer (Fe) bij aanwezigheid van Si. Opbrengsteffecten bij granen worden aangetroffen in situaties van lage P-toestanden, vooral veroorzaakt door een betere translocatie. De opbrengstresultaten bij gras zijn wisselend. Soms is er een positief effect op de opbrengst, soms niet. Positieve effecten zijn mogelijk ook toe te schrijven aan een betere spoorelementvoorziening als gevolg van de aanwezigheid van spoorelementen in veel Si-meststoffen, zoals slakken. Bij maïs worden soms ook positieve effecten gevonden. Vaak zijn deze toe te schrijven aan de pH-verhoging die optreedt bij gebruik van bijvoorbeeld slakken of andere silicaten. Anderzijds worden er op niet zure gronden ook positieve opbrengsteffecten gemeld. Niet duidelijk is waardoor deze meeropbrengst wordt veroorzaakt: een betere nutriëntenbenutting of een efficiëntere vochtbenutting.

De watergebruiksefficiëntie neemt toe naarmate het Si-gehalte stijgt. Per kg geproduceerde droge stof is minder water nodig door een lagere transpiratiesnelheid. Een betere watergebruiksefficiëntie is aangetoond bij rijst maar ook bij gras, tarwe en maïs, al uit zich dit niet altijd in een hogere drogestofopbrengst onder droge omstandigheden. Tegelijkertijd zijn er resultaten dat de zouttolerantie verbetert bij gebruik van Si. Dit effect is voor een deel verstrengeld met droogte. Onder de Nederlandse omstandigheden komt zoutstress niet vaak of maar beperkt voor en is het vaak tijdelijk van aard, zoals kort na een bemesting. De uitzonderingen zijn de gebieden waar verzilting optreedt (door zoute kwel) en in droge, warme zomers, waarbij door capillaire opstijging het zoutgehalte van de toplaag kan toenemen. Verzilting wordt gezien als een toenemend probleem. In de gebieden waar dat nu al optreedt kan Si-toediening de nadelige effecten voor gewasgroei mogelijk verminderen.

Positieve, indirecte effecten van Si-gebruik op de opbrengst zijn vooral aangetoond in het verre buitenland. Er zijn relatief weinig proeven in West-Europa met silicaathoudende meststoffen. Een belangrijke uitzondering hierop zijn proeven met 'slakken' (kalkmeststoffen met een hoog aandeel kiezelzuur). In een veeljarige Duitse proef met akkerbouwgewassen werden significant hogere opbrengsten gemeten in vergelijking tot gewone kalk, ook bij een gewas als maïs. In een Noors experiment werd bij toepassing van slakken een iets hogere grasopbrengst verkregen dan bij gebruik van kalk. De in slakken aanwezige, zware metalen leidden niet tot hogere zwaremetaalgehalten in gras.

Si-meststoffen – in Nederland weinig bekend – zijn slakken, een kalkhoudend bijproduct dat ontstaat bij het maken van ijzer uit ijzererts. Een andere belangrijke bron is kiezelzuur. Van de verschillende vormen van kiezelzuur zijn er vele zouten, de silicaten. De oplosbare vormen hiervan zijn natrium- en kaliumsilicaat. Recentelijk is ook calciumsilicaat als meststof beschikbaar gekomen. Kaliumsilicaat en slakken zijn de bekendste Si-meststoffen in Europa. In Nederland mogen slakken op dit moment niet worden toegepast als meststof.

Si wordt algemeen gezien als een factor die van invloed is op de voederwaarde en de verteerbaarheid. Meer Si verlaagt deze. Daarom wordt de voederwaarde in Nederland ook op asvrije basis uitgedrukt. Naast een eventueel effect op de verteerbaarheid is de voeropname van belang. In de beperkte proeven die zijn uitgevoerd op dit vlak kon geen enkel verband worden gevonden tussen de beweidingsvoorkeur en het Si-gehalte in gras. Op basis van de informatie in de literatuur lijkt er niet direct een bezwaar te zijn voor een verhoging van het Si-gehalte van gras. Nader onderzoek moet dit uitwijzen.

De vraag of we nu in Nederland ook maar Si moeten gaan gebruiken bij de teelt van gras en maïs kan

op dit moment niet afdoende beantwoord worden. Daar is een aantal redenen voor:

- 1) Onduidelijk is wat de Si-beschikbaarheid is in gronden, welke Si-gehalten in gewassen worden aangetroffen en welke relatie hiertussen bestaat. In Nederland wordt het gehalte oplosbaar Si in grond en het Si-gehalte in gras en maïs niet vastgesteld. In principe is dit goed mogelijk met de beschikbare meettechnieken. Daarbij lijkt extractie met 0,01 M CaCl₂ een goede maat voor de beschikbaarheid in grond.
- 2) Er zijn (nog) geen duidelijke criteria op basis waarvan besloten kan worden of Si-bemesting zinvol is. Niet duidelijk is hoe groot de effecten zijn op de fosfaatbeschikbaarheid en wat de opbrengstrespons is bij toepassing van Si op fosfaatarm gras- en maïsland. Hoewel de ziektedruk bij veel grassen duidelijk afneemt bij toepassing van Si moet nog worden aangetoond dat Si de kroonroestaantasting bij raaigras kan verminderen. Ook met betrekking tot droogtegevoeligheid ontbreken kwantitatieve gegevens voor de Nederlandse situatie om te beoordelen of het zinvol is om een Si-bemesting toe te passen.
- 3) De kosten en de voordelen dienen nader te worden gewogen. Dit kan pas indien meer duidelijkheid is verkregen met betrekking tot punt 1 en 2.

Samengevat kan geconcludeerd worden dat zowel met betrekking tot droogtetolerantie, ziektedruk als vanuit oogpunt van P-beschikbaarheid er perspectieven lijken te zijn voor het gebruik van oplosbaar Si. Om eventuele effecten te kunnen kwantificeren is aanvullend oriënterend onderzoek nodig. De volgende (globale) aanbevelingen worden daartoe geformuleerd:

- Bestudeer het effect van wel of geen oplosbaar Si op grasland op de aantasting van gras door kroonroest op één of meerdere locaties, waarvan bekend is dat deze gevoelig zijn voor kroonroest. Kroonroest - de belangrijkste schimmelziekte - heeft een negatief effect op de smakelijkheid en de kwaliteit. Bij kroonroestaantasting neemt het vee minder weidegras op. Dit gaat ten koste van de melkproductie. Het optreden van kroonroest is dan ook een belangrijk knelpunt bij weidegang.
- Stel via monitoring vast welke Si-gehalten in grond (beschikbaar) en in gras en maïs (totaal) worden aangetroffen en bestudeer het verband tussen het Si-gehalte in grond en gewas en bestudeer de voederwaardekenmerken.
- Monitor/analyseer de droogtetolerantie van Engels raaigras bij gebruik van wel of geen oplosbaar Si in een eenvoudige potproef en eventueel in een veldproef.
- Bestudeer de droogtetolerantie van maïs bij gebruik van wel of geen oplosbaar Si voor een aantal praktijksituaties op droogtegevoelige zandgrond.
- Stel het effect van Si op de P-beschikbaarheid vast voor fosfaatarme beekdalgrond. Dit kan zowel op basis van een potproef met gras als via monitoring van de grasopbrengsten van de eerste snede en de grassamenstelling in een beperkte veldproef. In het veld kan ook het gewas maïs worden getoetst.

1 Inleiding

1.1 *Mogelijkheden van Silicium*

Silicium (Si) is één van de basisbestanddelen van grond, maar is toch vrijwel niet in opneembare vorm aanwezig. Hoewel Si geen direct effect op de groei van de plant heeft is er wel een aantal indirecte positieve effecten op de gewasgroei. In Nederland is er nog nauwelijks ervaring met het toepassen van Si in de melkveehouderij, terwijl meer aandacht voor Si mogelijk kan bijdragen aan het oplossen van een aantal knelpunten in de gras- en maïssteelt via een verbetering van de

- 1) fosfaatbeschikbaarheid. Het voorgenomen beleid leidt tot een lagere P-bemesting. De P-rijenbemesting in maïs komt daarmee onder druk te staan. Daarnaast zijn er nog steeds percelen met een lage fosfaattoestand of zelfs fosfaatfixerende percelen. Si-toediening kan deze nadelige effecten tegengaan.
- 2) droogtetolerantie. Tegenwoordig is beregenen lang niet altijd meer mogelijk of is het streven om zo efficiënt mogelijk om te gaan met water. Verbetering van de droogtetolerantie door Si-toediening kan mogelijk een hogere gras- of maïsproductie betekenen bij dezelfde hoeveelheid beschikbaar water. Op sommige plekken lijkt ook verzilting een probleem te worden. Op dit punt kan Si-toediening mogelijk voordelen bieden, omdat planten bij Si-toediening een hogere zoutresistentie lijken te hebben.
- 3) weerstand tegen plantenziekten. In de veehouderij is roest op grasland de meest serieuze bedreiging, waardoor de smakelijkheid van het gras afneemt. Een lager stikstofgebruik lijkt de roestproblematiek te verergeren. Si-toediening kan roestvorming mogelijk onderdrukken.

Op basis van literatuurgegevens lijken er dus mogelijkheden voor Si te zijn voor wat betreft een hogere fosfaatbeschikbaarheid in de bodem, een betere droogte- en zouttolerantie en een hogere weerstand tegen ziekten. Volgens Matichenkov & Bocharnilova (2001) zou Si-bemesting op bijna alle bodems nut hebben, uitgezonderd bodems met een extreem hoog Si-gehalte. Een bijkomend voordeel is dat Si eenvoudig toegepast kan worden in de landbouw (Rodgers-Gray & Shaw, 2004). Het meeste onderzoek naar de voordelen van Si is echter uitgevoerd bij andere gewassen; vooral rijst, maar ook bijvoorbeeld tarwe en komkommer. In deze literatuurstudie zal gekeken worden naar de mogelijkheden van het gebruik van oplosbaar Si op gras en maïs; daarbij wordt ook gekeken naar andere gewassen.

1.2 *Doel*

Nagaan wat de mogelijkheden zijn van het gebruik van oplosbaar Si in de melkveehouderij om nadelige effecten van een lagere N- en P-bemesting en een hoger verdrogingsrisico te minimaliseren en de weerstand tegen ziekten te verhogen.

1.3 *Verwacht resultaat*

Een oriënterend resultaat over de mogelijkheden en beperkingen van Si-toediening aan gras- of maïsland. Op basis van deze bevindingen zullen eerste aanbevelingen voor de praktijk gegeven worden en zal aangegeven worden in hoeverre aanvullend experimenteel onderzoek nodig is.

2 Silicium in bodem

2.1 Silicium

Silicium (Si) is een element dat in de aardkorst op zuurstof na het meeste voorkomt. Si is meestal gebonden aan zuurstof of aan metalen als alumosilicaten (Matichenkov & Bocharnilova, 2001). De bodem bestaat voor gemiddeld ongeveer 50 procent uit SiO_2 (Marschner, 1995). Matichenkov & Bocharnilova (2001) onderscheiden verschillende Si-verbindingen (Tabel 2.1). De oplosbare Si-houdende verbindingen bestaan uit monosiliciumzuren, polysiliciumzuren en organosilicium-componenten. De meest voorkomende vormen van monosiliciumzuur zijn orthosiliciumzuur (H_4SiO_4 , $K=9,85$) en het anion daarvan (H_3SiO_4^-): bij bepalingen in bodemoplossingen wordt ervan uitgegaan dat dit het enige aanwezige monosiliciumzuur is (Matichenkov & Bocharnilova, 2001). Monosilicium is de vorm die opneembaar is voor planten.

De Si-concentratie in de bodemoplossing bedraagt 3,5 tot 40 mg l^{-1} (Marschner, 1995) in de vorm van siliciumzuur, waarvan de bron onder andere SiO_2 is (Epstein, 2001). Kwarts zelf is nauwelijks oplosbaar: de activiteit van siliciumzuur in contact met kwarts is minder dan 0,1 mM (3 mg l^{-1}). De concentratie van siliciumzuur is in de meeste bodemoplossingen hoger, omdat het onttrokken wordt aan aluminosilicaten. Bij oververzadiging met siliciumzuur in een oplossing, slaat het neer in een amorfe vorm, die reactiever is dan de gekristalliseerde vorm: bij chemisch evenwicht is de concentratie van siliciumzuur dan 1,8 mM ofwel 50 mg l^{-1} (Epstein, 2001).

Polysilicium bestaat uit twee of meer siliciumatomen. Polysilicium is ingewikkelder van structuur dan monosilicium: het kan uit langere, vertakte ketens bestaan. Wanneer er meer polysilicium in de bodemoplossing zit, heeft dit (positieve) effecten op bijvoorbeeld de watervasthoudende capaciteit en de buffercapaciteit in lichte bodems. Ook wanneer Si in de vaste fase voorkomt, kan het positieve effecten op de watervasthoudende capaciteit hebben (Matichenkov & Bocharnilova, 2001).

De beschikbaarheid van Si in de bodem is afhankelijk van verschillende factoren, zoals temperatuur, bodemvochtigheid, pH, calciumcarbonaat, organische stof en redoxpotentiaal (Rodgers-Gray & Shaw, 2004), maar ook van het bodemtype. In Japan is hier uitgebreid naar gekeken, omdat Si een belangrijk element is bij de rijstteelt. Gronden bestaand uit vooral kwarts (zandgronden) en veengronden hebben weinig gemakkelijk opneembaar Si. Kleigronden hebben in het algemeen meer beschikbaar Si.

Toevoegen van oplosbaar Si heeft positieve effecten op de bodemstructuur (Rex, 2000).

Tabel 2.1. Siliciumhoudende componenten in de bodem, onderverdeeld in de vloeibare en vaste fase.

Vloeibare fase	vaste fase	
	amorf	kristallen
monosiliciumzuren	biogene vormen (phytoliet restanten)	fijn gedispergeerde mineralen (mica's, kleien etc.)
polysiliciumzuren	abiogene vormen (amorfe silica)	ruw gedispergeerde mineralen (kwarts, veldspaten)
complexen met anorganische componenten		
complexen met organische componenten		
organo-siliconen componenten		

2.2 Effect temperatuur, vocht, redoxpotentiaal, pH, kalk, klei en organische stof op Si in de bodem

In het algemeen is een hoge temperatuur gunstig voor de beschikbaarheid van een element. Met betrekking tot Si zijn weinig experimenten bekend waarin naar het effect van de temperatuur is gekeken. Mattigod & Kittrick (1980) hebben het gedrag van een kaoliniet-gibbsiet systeem bestudeerd over het temperatuurtraject van 25-95 °C. Over dit traject neemt de oplosbaarheid van orthosiliciumzuur met een factor 4 toe en die van amorf Si met een factor 3.

Bij een hoger vochtgehalte in de bodem is er meer Si-beschikbaar (Subramanian & Gopalswamy, 1991). Voor een deel komt dit doordat meer bodemvocht zorgt voor betere transportmogelijkheden van Si. Een belangrijker effect is echter het effect van een gewijzigde redoxpotentiaal. Indien de grond vochtiger wordt of zelfs helemaal onder water komt te staan dan leidt dit tot een daling van de redoxpotentiaal (deze kan sterk negatief worden). Een mooi voorbeeld hiervan is een experiment van Matsuura et al. (1977) waaruit blijkt dat bij een redoxpotentiaal tussen -120 en -50 mV slechts 70 procent van de hoeveelheid Si wordt aangetroffen ten opzichte van een redoxpotentiaal van -200 mV (deze effecten zijn beter bekend bij ijzer: naarmate de zuurstofbeschikbaarheid afneemt wordt ijzer beter beschikbaar. In deze proef was het Fe-gehalte tussen -120 en -50 mV 50 procent bij die van -200 mV). Obermueller & Mikkelsen (1974) geven aan dat de daling van de redoxpotentiaal in hun experiment de belangrijkste oorzaak is voor een betere Si-beschikbaarheid en Si-opname van rijst bij natte rijstbouw in vergelijking tot droge rijstbouw. Ook McGeehan et al. (1998) tonen aan dat een lage redoxpotentiaal gunstig is voor de beschikbaarheid van Si.

Voor de Nederlandse situatie kan een situatie met een lage redoxpotentiaal optreden in de winter. Gedurende het groeiseizoen is de vochttoestand op gras- en maïsland dusdanig dat een lage redoxpotentiaal niet voorkomt (behoudens calamiteiten als stortbuien). Voldoende vocht is vooral van belang om een goed transport van nutriënten te kunnen waarborgen.

Het effect van pH op de Si-beschikbaarheid lijkt tegengesteld te zijn. Zo wordt in de literatuur uit China, Japan en Korea vooral gemeld dat een hoge pH de Si-beschikbaarheid verhoogt (Kim et al., 1977; Zhang, 1987; He-LiYua & Li-XiaoLiang, 1995). Daarentegen is er veel andere literatuur die het tegenovergestelde aangeeft. Deze verschillen zijn waarschijnlijk voor een groot deel terug te voeren op een verstrengeling met de redoxpotentiaal. In Aziatische landen vindt vaak natte rijstbouw plaats. Dat betekent dat de redoxpotentiaal van de grond laag is en de beschikbaarheid hoog. Voor situaties waar de grond niet onder water staat, zeg maar de voor ons gangbare landbouw, is de redoxpotentiaal hoog en neemt de Si-beschikbaarheid toe bij verlagen van de pH (Curtin & Smillie, 1986; Brown & Mahler, 1987; Leusch & Buchenauer, 1989). De belangrijkste component in de bodemoplossing, siliciumzuur, is een zwak zuur. Naarmate de pH daalt is er meer Si niet gedissocieerd (dus H_4SiO_4). Dit is in principe beter beschikbaar dan het anion ($H_3SiO_4^-$) dat gemakkelijk verbindingen aangaat met kationen en gemakkelijk kan adsorberen. Waarom onder zeer natte omstandigheden het effect tegenovergesteld is wordt niet verder nagegaan, omdat deze situatie niet relevant is voor de Nederlandse situatie.

De toepassing van kalk leidt tot een verhoging van de pH. Op basis van het voorafgaande neemt daarmee de beschikbaarheid van Si af. Echter in kalk kunnen ook Si-verbindingen aanwezig zijn. De hoeveelheid en de vorm waarin Si in kalk aanwezig is hangt af van de herkomst van de kalk en of de bewerkingen die kalk heeft ondergaan. Zo wordt in de ijzerertsindustrie veel kalk gebruikt bij de bereiding van staal (bijvoorbeeld 'Converterkalk', 'Hüttenkalk'. Deze kalken bevatten voor een deel goed beschikbare Si-verbindingen, zeker zodra bij toepassing de natuurlijke verzuring zijn werk doet (Kato & Owa, 1996). Deze producten worden dan ook mede gebruikt om de Si-beschikbaarheid in Si-behoefteige

teelten, zoals de rijstbouw (Ma & Takahashi, 2002).

Naarmate de grond meer klei bevat is er in het algemeen meer Si beschikbaar (Schwandes et al., 2001, Zhang, 1987). Dit heeft te maken met de opbouw van het kleimineraal dat voor een deel uit aluminosilicaten bestaat. Schnug & Von Franck (1985) vonden de laagste gehalten in granen geteeld op podsolen gevolgd door bruine bodems en Marschgronden (gronden langs de kust, klei bevattend).

Er is weinig bekend over het effect van organische stof op de beschikbaarheid van Si. De gegevens die er zijn hebben vooral betrekking op natte rijstteelt. Daar blijkt een hogere gehalte organische stof of toevoer van organische stof (bijvoorbeeld in de vorm van compost) in het algemeen gunstig te werken op de beschikbaarheid van Si ((Ma & Takahashi, 2002). Er is één experiment bekend waarin in een potproef met gerst organischestof toevoer aan de grond leidde tot lagere Si-gehalten in de gerst (Nishita et al., 1973). Op basis van de gevonden informatie in de literatuur kan geen duidelijke uitspraak worden gedaan of meer organische stof leidt tot hogere Si-gehalten in gras en maïs.

2.3 *Bepaling beschikbaar Si*

Beschikbaarheidsbepalingen vinden vooral plaats bij de teelt van rijst en suikerriet. Ma & Takahashi (2002) beschrijven een zestal bepalingmethoden. Sommige daarvan zijn nogal tijdrovend. Eén van de bekendste methoden is extractie met natriumacetaatbuffer (pH 4,0) gedurende 5 uur bij 40 °C (Ma & Takahashi, 2002; Snyder, 2001). De vraag is hoe goed de bepalingmethoden toepasbaar zijn voor de landbouw zoals wij die kennen. Rijstteelt vindt vaak plaats op gronden die onder water staan. Het oplosbaarheidsgedrag van Si is onder deze omstandigheden anders dan onder droge omstandigheden (vanwege het verschil in redoxpotentiaal).

Ook bij de teelt van suikerriet is de bepaling van de Si-beschikbaarheid van belang. Haysom & Chapman (1975) stelden (uit Snyder, 2001) extractie met 0,01 M CaCl₂ voor gedurende een periode van 16 uur. Deze extractie gaf een correlatie van 0,903 met de suikerrietopbrengst en gaf betere resultaten dan extractie met 0,5 M ammoniumacetaat of met 0,005 M zwavelzuur. Snyder (2001) noemt in zijn overzicht nog enkele andere bepalingmethoden, waaronder extractie met 0,5 M azijnzuur gedurende 2 uur na een nacht inwerken van de extractievloeistof. In Florida is deze extractie populair zowel bij de rijstbouw als de suikerrietteelt.

3 Silicium in de plant

3.1 *Silicium als voedingsstof voor planten*

Silicium komt in vrijwel alle gewassen voor. Het is nog niet aangetoond dat Si een essentieel element is: ook zonder de aanwezigheid van Si kan de plant zijn levenscyclus voltooien (Marschner, 1995).

Echter, Si heeft wel gunstige effecten op de meeste planten. Effecten van Si hebben betrekking op de plantenstructuur, -fysiologie en als bescherming tegen pathogenen/ziekten. Met betrekking tot de structuur betreft het vooral de bescherming tegen compressie in celwanden, onder andere bij doorwortelen van de bodem. Een sterkere stengel verbetert de lichtinterceptie en vermindert legering door bijvoorbeeld wind. Sterkere zaden verbeteren de retentie van de zaden. Fysiologische functies zijn een vermindering van evapotranspiratie, verbeteren van de zuurstofvoorziening van de wortels door wanden van luchtkanalen, interacties met fosfor en vermindering van toxiciteit van metaal.

Beschermende functies omvatten resistentie tegen pathogenen, insecten en herbivoren (Sangster et al., 2001).

Bij afwezigheid van Si treedt er stress voor de plant op, wat zich in verschillende symptomen kan uiten. Bij rijst bijvoorbeeld wordt de vegetatieve groei minder, de graankorrelproductie gaat omlaag en er kan necrose van het blad en verwelking van de planten optreden. Bij suikerriet wordt er minder anorganisch fosfaat in ATP, ADP en suikerfosfaten ingebouwd en bij tarwe neemt de hoeveelheid lignine in de wortels af en het aantal fenolische componenten toe. Planten met een tekort aan Si verschillen van planten die wel voldoende Si hebben in onder andere (Epstein, 2001)

- i. chemische samenstelling;
- ii. structurele kenmerken;
- iii. mechanische sterkte;
- iv. verschillende aspecten van groei (ook oogstopbrengst);
- v. enzymactiviteit;
- vi. oppervlaktekarakteristieken;
- vii. resistentie tegen ziekten en plagen;
- viii. resistentie tegen metaalvergiftiging;
- ix. zouttolerantie;
- x. waterrelaties; en
- xi. koudegevoeligheid.

Planten kunnen verdeeld worden in Si-accumulatoren, waarbij de plant meer Si opneemt dan hij door passieve opname met water binnen krijgt, en niet-accumulatoren, waarbij de plant evenveel, of minder Si opneemt dan door passieve absorptie (Marschner, 1995). Met name rijst is bekend als Si-accumulator, maar ook andere granen accumuleren Si. In accumulerende soorten is de Si-opname gerelateerd aan het metabolisme in de wortel en niet aan de transpiratiecoëfficiënt. Volgens Marschner (1995) zijn grassen in het algemeen, en met name natte rijst, typische Si-accumulatoren. Het meeste onderzoek naar Si-gebruik is dan ook uitgevoerd bij rijst. Gewassen die geen Si accumuleren, zijn bijvoorbeeld de meeste dicotylen. Echter, ook bij niet-accumulerende dicotyle soorten kan Si voordelen bieden. In deze soorten verhoogt Si bijvoorbeeld de fysiologische beschikbaarheid van zink (P).

De variatie in Si-gehalten van planten is groot. In klaver is de concentratie laag, slechts 0,04 tot 0,13 procent in de droge stof, terwijl het in rijst juist erg hoog is: gehalten tot 10 procent komen voor. De

meeste dicotylen hebben lage Si-gehalten, ook in luzerne is het niet hoog: 0,1 tot 0,2 procent. In gras is het Si-gehalte 0,3 tot 1,2 procent (bron: internet, eurolab.nl). In de meeste gewassen gebeurt de absorptie van Si passief.

Jones & Handreck (1967, volgens Epstein, 1999) maakten onderscheid in drie groepen: de 'wetland gramineeën', met Si-gehalten van 10-15 procent, de 'dryland-grassen' (waaronder gerst en haver) met gehalten van 1-3 procent en dicotylen met gehalten van minder dan 1 procent (er zijn wel dicotylen met hogere gehalten). Voor gerst bijvoorbeeld blijkt het Si-gehalte in de korrel vaak tussen 2 en 3 procent te schommelen (Ma & Takahashi, 2002, appendix 4B). De grondsoort kan hier een grote invloed op hebben. Schnug & Von Franck (1984) vonden in Noord-Duitsland de laagste gehalten op podsolen (arme zandgronden) en de hoogste gehalten op zeekleigronden.

Planten met meer dan 1 procent Si in het blad, in de droge stof, worden als Si-accumulator gezien (Epstein, 1994), en in een onderzoek van Ma & Takahashi (in Epstein, 1994) waren dit 34 van de 175 soorten (19 procent). In Engels raagras is het gehalte afhankelijk van het niveau van de Si-toediening. In onderzoek van Jarvis (1987) varieerde het gehalte in het blad van <0,01 procent zonder Si-toediening tot 1,43 procent met Si-toediening. In wortels waren de gehalten lager, tot maximaal 0,82 procent (Jarvis, 1987). In het algemeen is er echter weinig informatie te beschikbaar over het Si-gehalte in Engels raai. Wel lijkt Engels raai de laagste gehalten te hebben van de grassen (Ma & Takahashi, 2002, appendix 3D). In maïs waren de gehalten maximaal 0,36 mg g⁻¹ in de stengel en 0,72 mg g⁻¹ in de wortels (Owino-Gerroh & Gascho, 2004). Positieve effecten van Si op opbrengst en kwaliteit worden vooral waargenomen bij de teelt van rijst en suikerriet, maar ook wel bij aardbeien, komkommer, tomaten, sorghum en parelgierst.

Silicium is dus voor de meeste gewassen niet noodzakelijk, maar wordt over het algemeen wel gunstige effecten toegedicht, zoals

- een positief effect op weerstand tegen ziekten;
- een mogelijk hogere benutting van voedingsstoffen zoals fosfaat;
- een verbeterde waterhuishouding; en
- een hogere zouttolerantie bij bemesting met Si.

Om er achter te komen of Si ook werkzaam is in gras en maïs, is het noodzakelijk om inzicht in de precieze werking van Si op fosfaatbenutting, droogteresistentie en weerstand tegen ziekten te krijgen. Daarvoor is inzicht in zowel de plantfysiologie als in bodemprocessen nodig. Deze aspecten worden in de navolgende paragrafen en hoofdstukken behandeld.

3.2 Opname en depositie van Si in de plant

In sommige planten (niet-accumulerend) wordt Si passief opgenomen, in andere soorten (accumulerend) wordt het actief opgenomen. Maar volgens Raven (2001) kan via passief transport slechts zeer weinig Si worden opgenomen. De epidermis (opperhuid) is een barrière voor Si-transport. In de plant wordt Si op verschillende plaatsen afgezet (silificatie). De silificatie van de endodermis (binnenste laag van de schors, grenzend aan de centrale cilinder) fungeert als mechanische barrière tegen pathogenen en parasieten. Siliciumhoudende structuren in de plant worden phytolieten genoemd. Si wordt over lange afstanden getransporteerd in het xyleem, en relatief veel Si wordt afgezet in de wanden van de xyleemvaten. Dit is mogelijk belangrijk voor het tegengaan van compressie bij hogere transpiratie. Epidermale celwanden zijn geïmpregneerd met een siliconenlaag. Dit biedt bescherming tegen teveel waterverlies door transpiratie van de cuticula en tegen schimmelinfecties. In grassen is ook veel Si van het bladoppervlak intracellulair gelokaliseerd. Eenmaal in de plant afgezette Si, kan niet gerelokaliseerd worden.

Si is van belang voor de vorming van lignine, maar het levert ook extra stabiliteit door het afzetten van Si in gellignificeerde celwanden. Het werkt mee aan het versterken van celwanden, maar het kan ook de elasticiteit verhogen tijdens celstrekking. De stevigheid van de plant wordt daarmee verhoogd. Het vermindert bijvoorbeeld de graanlegering en zorgt ervoor dat het blad recht overeind blijft staan. Bij rijst gaat een verhoogde N-bemesting gepaard met een minder rechtop staand blad en Si kan dit voor een deel teniet doen. Het effect van Si komt grotendeels van de depositie in de epidermis en is dus gerelateerd aan beschikbaar Si.

De depositie van Si in de plant is afhankelijk van de leeftijd, het type en de locatie van de weefsels, en van opname via de wortel en transpiratie (Sangster et al., 2001). De opname door de wortel is afhankelijk van Si-, nutriënten- en watergehalten in de bodem, pH en bodemtype. Si wordt afgezet in de celwand, in de celinhoud en in intercellulaire ruimtes van wortel, stengel of blad. Hoe ouder de plant of het weefsel, hoe hoger het Si-gehalte. Over het algemeen zit er in de wortel het minste, in de stengel wat meer, en in het blad het meeste Si. Ook in de bloeiwijze is het Si-gehalte hoog.

Er is verschil in Si-gehalte aan de boven- en aan de onderkant van een blad. In bijvoorbeeld *Sieglingia decumbens* (tandjesgras) wordt Si alleen maar afgezet in gespecialiseerde epidermale cellen boven de bladvaten, waardoor grote gebieden tussen de vaten grotendeels vrij van siliciumdeposities zijn. Met name aan de bovenkant van het blad kunnen grote hoeveelheden afgezette Si interfereren met de lichttransmissie naar het mesophyll chlorenchym, terwijl het intern een effect kan hebben op permeabiliteit en transport (Sangster et al., 2001). In gerst blijkt het Si-gehalte hoger te zijn aan de onderkant van het blad. Het is niet duidelijk hoe voorkomen wordt dat in bepaalde gebieden geen Si wordt afgezet.

In tarwewortels wordt Si met name afgezet in de endodermale celwanden. Wanneer deze gesilificeerd zijn, zal opgenomen Si naar de stengel getransporteerd worden. Het is niet duidelijk waarom alleen in de endodermale wanden Si wordt afgezet.

Depositie van Si zou zowel passief als actief kunnen zijn. Met name op plaatsen waar veel Si aanwezig is (endodermis), zou het bijna wel actief moeten zijn.

3.3 Bepaling Si-gehalte plant

In diverse gewassen wordt het Si-gehalte bepaald. Verschillende procedé's zijn daarvoor beschikbaar. In principe berusten deze op een totale destructie van het gewas materiaal. Snyder (2001) geeft een overzicht van een aantal technieken. Eén ervan komt uit Nederland en wordt als zodanig ook toegepast. Het betreft een 'snelle' ontsluiting op basis van HCl en HF, welke de voorkeur heeft boven de klassieke methode van droog verassen gevolgd door samensmelting met natriumcarbonaat, of natte destructie met HF en HNO₃ in een gesloten systeem. De vaststelling van het Si-gehalte in gewasmateriaal vindt vooral plaats bij de teelt van rijst en suikerriet.

4 Resistentie tegen schimmels en ziekten

4.1 Werkingsmechanismen

Silicium wordt al honderden jaren gebruikt vanwege zijn profylactische eigenschappen met betrekking tot plantenziekten (vooral in de rijstteelt). De positieve effecten zijn vaak goed gedocumenteerd. Het is veel minder duidelijk hoe Si werkt. Bovendien lijkt er een verschil te bestaan in werking en werkingsmechanismen tussen monocotylen en dicotylen.

Veel onderzoek is er verricht bij rijst (Ishiguro, 2001). Bij rijst is het zo, dat hoe meer Si er toegediend wordt, hoe meer Si in het blad terecht komt. De gevoeligheid voor schimmelziekten gaat daarbij omlaag. De hogere resistentie is direct gerelateerd aan de Si-concentratie in het groeimedium en in het rijstblad. Bij rijst wordt Si met name afgezet in volwassen bladeren, terwijl 'rice blast (*Magnaporthe grisea*)' met name voorkomt in jonge bladeren. Ondanks dat heeft de toediening van Si een duidelijk positief effect en doet het de effecten van verhoogde gevoeligheid voor rice blast door een verhoogde stikstofbemesting bijna teniet.

Fysische barrières worden gedacht verantwoordelijk te zijn voor de ziekeresistentie van planten (Nicholson & Hammerschmidt 1992; Raid et al., 1992). Fungi worden daardoor beperkt in de mogelijkheden om een plant te penetreren. Op plekken waar penetratie van fungi plaatsvindt, wordt extra Si afgezet rond de infectiehaard. Het optreden van een fysische barrière wordt voor de monocotyl rijst als meest waarschijnlijke verklaring gezien (Ishiguro, 2001). Ook bij dicotylen is extra afzetting van Si rond de infectiehaarden waargenomen (Heath, 1981). Dit versterkt de gedachte van een fysische barrière als oorzaak voor resistentie. Ook prikmetingen geven aan dat er een hogere weerstand voor penetratie is bij veel Si in de epidermis. Toch sluit Ishiguro (2001) niet uit dat er een andere verklaring is voor de werking van Si. Het feit dat Si wordt afgezet op geïnfecteerde plaatsen laat zich verklaren uit het feit dat gepolymeriseerd Si een sterke affiniteit heeft voor organische polyhydroxylcomponenten zoals orthodifenolen, welke betrokken zijn bij de synthese van lignine. Deze eigenschap verklaart de tendens van Si-accumulatie bij infectiehaarden. Met behulp van lignine tracht de plant de beschadiging van de celwand op te heffen en zo wordt er dus ook extra Si afgezet (Fawe et al., 2001).

Onderzoek bij komkommer (dicotyl) lijkt aan te geven dat Si een actieve rol speelt in komkommer pathogene interacties. Hierbij heeft Si waarschijnlijk een signaalfunctie om afweerreacties te induceren. Bij komkommer zijn deze afweermechanismen van fenolische aard en komen overeen met een patroon typisch voor phytoalexinen zoals voor het eerst gesuggereerd door Menzies et al. 1991b en Chérif et al., 1994. Biochemisch onderzoek van Fawe et al. (1998) bevestigde de aanwezigheid van fenolische zuren en flavoniden in geïnfecteerde komkommerbladeren. De afweerwerking treedt alleen op zolang er oplosbaar Si beschikbaar is. In proeven met voedingsoplossingen, waarbij na verloop van tijd de Si-houdende oplossing vervangen werd door een oplossing zonder Si, verdween namelijk de afweerreactie ondanks dat er Si in de plant aanwezig was (Samuels et al., 1991b). Praktisch gezien betekent dit dus dat in een groeimedium voldoende gemakkelijk beschikbaar Si aanwezig moet zijn voor een optimale afweerreactie. Verder werd bij komkommer vastgesteld dat er een optimum is voor het Si-gehalte in de voedingsoplossing. Hogere gehalten dan 100 ppm gaven niet meer ziekteonderdrukking (Menzies et al., 1991a).

Of er een verschillend mechanisme bij monocotylen en dicotylen ten grondslag ligt aan het

afweermecanisme is niet geheel duidelijk. Fawe et al., (2001) wijzen erop dat bij monocotylen vooral gebruik gemaakt is van microscopisch onderzoek terwijl bij dicotylen gebruik gemaakt is van biochemisch onderzoek. Het is volgens Fawe et al. (2001) de moeite waard om vast te stellen of hetzelfde mechanisme optreedt als bij dicotylen. Een recente studie van Rodrigues et al. (2004) geeft aan dat ook bij rijst verhoogde gehalten aan phytoalexinen worden aangetroffen bij rijst geïnfecteerd met 'blast' bij aanwezigheid van Si. Dit lijkt erop te duiden dat zowel bij dicotylen als monocotylen Si de actieve en niet de passieve afweer stimuleert.

4.2 Effecten bij grasachtigen

Zoals eerder reeds is aangegeven zijn de ziekteweerbaarheidseffecten het best onderzocht bij rijst en komkommer. De vraag is echter of deze effecten op ook optreden bij grasachtigen, in het bijzonder bij gras en maïs.



Figuur 4.1. Bladverbranding en bladdood door 'Gray leaf spot' (*Pyricularia grisea*) in St. Augustine gras (*Stenotaphrum secundatum*) of buffelsgras.

Tarwe

Rodgers-Gray & Shaw (2004) onderzochten in Engeland voor tarwe het effect van Si op vier blad- en twee stamgebaseerde pathogenen. Daartoe zijn potproeven uitgevoerd met kalkrijke klei, twee lemige gronden en zandgrond en is er een potproef uitgevoerd met een mengsel van zand en vermiculiet. De hierop groeiende tarwe werd geïnfecteerd met de bladpathogenen (het zand- en vermiculietmengsel werd ook geïnfecteerd met de bodempathogenen). Twee keer per week werd 100 ml vocht toegediend met 0 of 100 mg Si l⁻¹. De resultaten zijn in Tabel 4.1 weergegeven. Het blijkt dat toediening van Si in alle situaties een lagere aantasting geeft. In een aantal gevallen is het effect significant. Rodgers-Gray & Shaw concluderen op grond van hun onderzoek dat positieve effecten van Si vooral optreden bij een hoge ziektedruk.

Tabel 4.1. Effect van Si op verschillende pathogenen bij tarwe (naar Rodgers-Gray & Shaw, 2004).

Pathoogeen	beoordeling	4 gronden		zand+vermiculiet	
		onbehandeld	Si % reductie*	onbehandeld	Si % reductie*
Blumeria graminis (bladvlekkenziekte)	% hevigheid	5	45^a	6	
Mycosphaerella graminicola (meeldauw)	sporen (mg l ⁻¹)	330	-13		67^a
Mycosphaerella graminicola	% hevigheid			4	29
Puccinia recondita (bruine roest)	% voorkomen	35	22	25	18
Oculimacula yallundae oogvlekken ziekte)	% voorkomen	26	54^a	35	22
Phaeosphaeria nodorum(kafjesbruin)	% hevigheid			5	31
Fusarium culmorum (voetziekte)	hevigheid (0-5)			0,49	24

* ten opzichte van onbehandeld

a: significant effect

Gras

Pas de laatste tijd verschijnen er onderzoeksresultaten omtrent het effect van Si op de ziektedruk bij grassen, waarvan een enkele met Engels raaigras. Zo hebben Nanayakkara et al. (2005) een proef uitgevoerd met Engels raaigras op twee grondsoorten. Hieraan zijn verschillende hoeveelheden Si toegediend in de vorm van Wollastonite en calciumsilicaat. Ingezaaid Engels raaigras werd na negen weken geïnoculeerd met Magnaporthe grisea (ook wel Pyricularia grisea genoemd). Het onderzoek gaf aan dat de ernst van de aantasting met 11-24 procent omlaag ging door Si-bemesting. Er zijn geen resultaten bekend van het effect van Si op de aantasting door kroonroest, de meest serieuze bladschimmelziekte bij Engels raaigras.

Schmidt et al. (1999) vonden bij toediening van Si – ongeacht het bemestingsniveau – aan Creeping Bentgrass (Agrostis palustris, komt in Nederland van nature niet voor) een veel geringere aantasting met 'Dollarspot disease' (Rutstroemia floccosum of Sclerotinia Homeocarpa). Vooral Agrostis spp zijn gevoelig voor aantasting. In Nederland komt Dollarspot voor op 85 procent van de golfbanen (Mann, 2004).

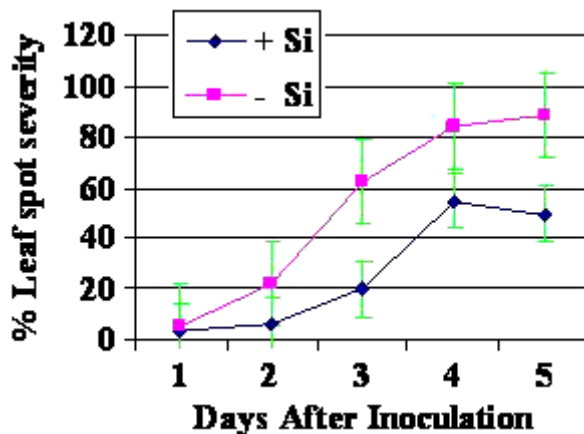
In proeven met St. Augustine gras gaf Si-toediening 17 tot 78 procent minder ontwikkeling van grijze bladvlekkenziekte (Datnoff & Rodrigues, 2005). Bij handjesgras gaf toediening van Si 39 procent minder lesions als gevolg van aantasting door bladvlekkenziekte (Datnoff & Rutherford, 2004). In Figuur 4.2 is weergegeven hoe de aantasting zich ontwikkelde na inoculatie met *Bipolaris cynodontis*.

Een overzicht van een aantal recente resultaten voor diverse grassen en pathogenen is weergegeven in Tabel 4.2. Si verbetert de resistentie van diverse grassen en heeft effect op diverse pathogenen.

Tabel 4.2. Zodegrassen: ziekten en plant pathogenen in response op silicaten (Naar Datnoff, 2005).

Zodegras	ziekte	pathogeen	effect ^x	referentie(s)
Zoysiagrass, <i>Zoysia japonica</i>	Leaf blight	<i>Rhizoctonia solani</i>	<	Saigusa et al., 2000
fioringras	Wortelrot	<i>Pythium aphanidermatum</i>	<	Gussack et al., 1998 North Carolina State. 1997
	Bruine vlekken	<i>Rhizoctonia solani</i>	<	Rondeau, E. 2001 Schmidt et al., 1999
	"Dollar plekken"	<i>Sclerotinia homoeocarpa</i>	<	Uriarte et al., 2004
veldbeemd	meeldauw	<i>Sphaerotheca fuliginea</i>	<	Hamel & Heckman, 1999
handjesgras	bladvlekken	<i>Bipolaris cynodontis</i>	<	Datnoff & Rutherford (2004)
St. Augustine-grass	grijze bladvlekken	<i>Magnaporthe grisea</i>	<	Brecht et al., 2004 Datnoff & Nagata 199
raaigras	grijze bladvlekken	<i>Magnaporthe grisea</i>	<	Nanayakkara et al., 2004

^x Silicium toegediend als calcium- of kaliumsilicaat; afname (<) ziekte intensiteit.



Figuur 4.2. Effect van Si op de ontwikkeling van bladvlekkenziekte bij handjesgras.

De recente resultaten met grasachtigen wijzen erop dat een hogere opname van Si een lagere ziektedruk geeft. Niet duidelijk is hoe hoog de Si-opname moet zijn voor een substantiële vermindering van de ziektegevoeligheid. Dit is vooral van belang voor Engels raaigras (het belangrijkste gras in Nederland). Mogelijk leidt een hogere Si-opname door gras tot een lagere smakelijkheid (zie verderop). Aanvullend onderzoek is nodig, vooral ook om vast te stellen of Si leidt tot minder kroonroest. Met een krappere wordende N-bemesting neemt de groeisnelheid in het najaar verder af, met als gevolg een grotere kans op aantasting door kroonroest. Via de veredeling wordt weliswaar gewerkt aan een betere resistentie tegen kroonroest, maar Si kan mogelijk een waardevolle bijdrage leveren.

Er zijn aanwijzingen dat meer Si in de plant ook leidt tot een lagere aantasting door insecten. Moore

(1984; in Sangster et al., 2001) vond dat bepaalde cultivars van raaigras met een hoger gehalte aan Si, met een onregelmatigere verdeling van phytolieten, beter bestand zijn tegen de fritvlieg dan andere cultivars. Hij suggereert hierop te telen, vooral in de graszaadteelt

In de graszaadteelt kunnen de larven (maden) van de fritvlieg vrijwel het gehele groeiseizoen schade veroorzaken. Zo kunnen bij een aantasting in het voorjaar in het schietstadium de gevormde aren of pluimen van het gras geheel of gedeeltelijk beschadigd worden (eerste generatie). Kenmerkend voor deze aantasting zijn de loszittende halmen, die later overgaan in witarigheid. Dit komt voornamelijk voor bij roodzwenk- en hardzwenkgras en soms bij de andere grassen. Het meest actief is de fritvlieg bij de zomerzaai van de raaigrassen vanaf de zaai tot in het 3 à 4 bladstadium, en bij de zaai van Westerwolds raaigras in het voorjaar. Soms is de schade zo groot dat opnieuw moet worden gezaaid. Aantasting kan zich na alle voorvruchtgewassen voordoen, maar het risico na graan- of grasgewassen is aanmerkelijk groter.

Maïs

Maïs is in Nederland relatief weinig vatbaar voor ziekten. Maïs kan aangetast worden door stengelrot (*Fusarium* spp.), dat vooral voorkomt als de plant aan het afrijpen of verzwakt is. De voet van de stengel wordt zacht, waardoor de stengel omknikt. In een warme zomer kan ook builenbrand optreden. Hierbij worden in plaats van korrels builen, vruchtlichamen van de schimmel, in de kolf gevormd.

In de literatuur worden vrijwel geen resultaten gemeld van het effect van Si op een verminderde ziektedruk bij maïs. Via internet is één proef gevonden waarin het effect van Si op de ziektedruk bij zoete maïs werd nagegaan. Er werd nauwelijks een effect gevonden maar dit hing ook samen met het feit dat de onbehandelde varianten weinig ziekten vertoonden

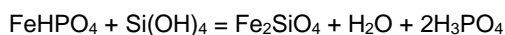
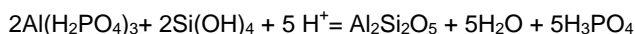
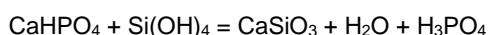
(http://www.gladescropcare.com/PMAP_chap4.pdf).

Daar ziekte in het algemeen niet zo'n probleem is in maïs, is er geen grote noodzaak voor nader onderzoek naar de relatie tussen Si en ziektedruk in maïs.

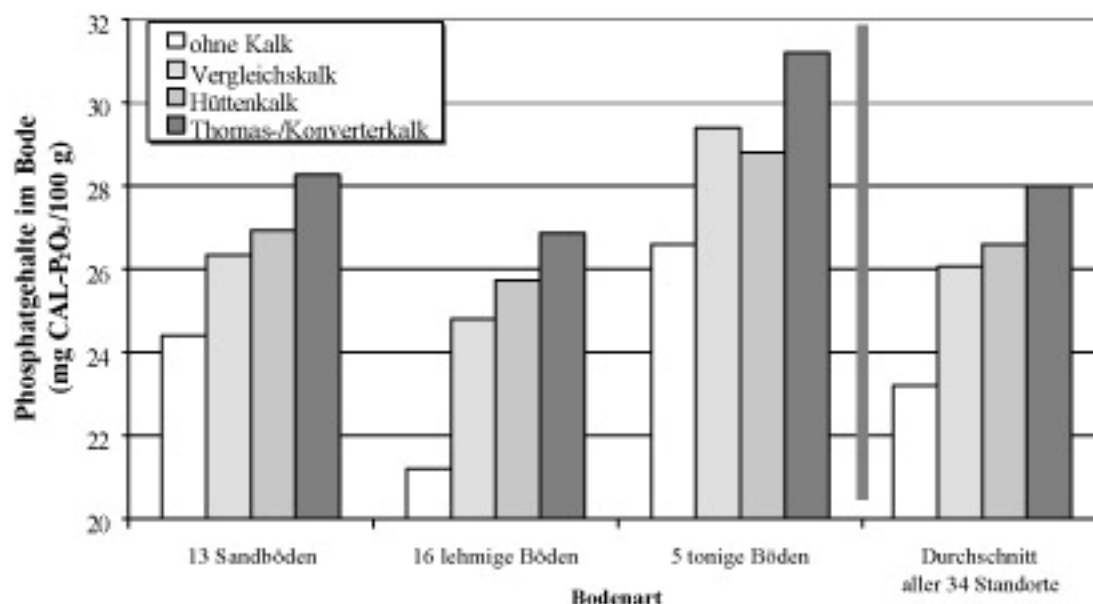
5 Benutting voedingsstoffen: P

5.1 Algemeen

Al lange tijd is bekend dat monosiliciumzuur van invloed is op de P-beschikbaarheid (Hall & Morrison, 1906). De laatste 10-20 jaar wordt echter duidelijker hoe Si en P interacteren. Vastgesteld is dat verschillende Si-meststoffen (amorf SiO₂, silicagel, calcium-, kalium- of natriumsilicaten) de hoeveelheid mobiel fosfaat in de bodem kunnen verhogen (Gladkova, 1982; Matichenkov & Ammosova, 1996; O'Reilly & Sims 1995; Singh & Sarkar, 1992). Berekeningen van Matichenkov & Ammosova (1996) geven aan dat dit berust op vervanging van het fosfaatanion door het silicaatanion en wel op de volgende wijze.



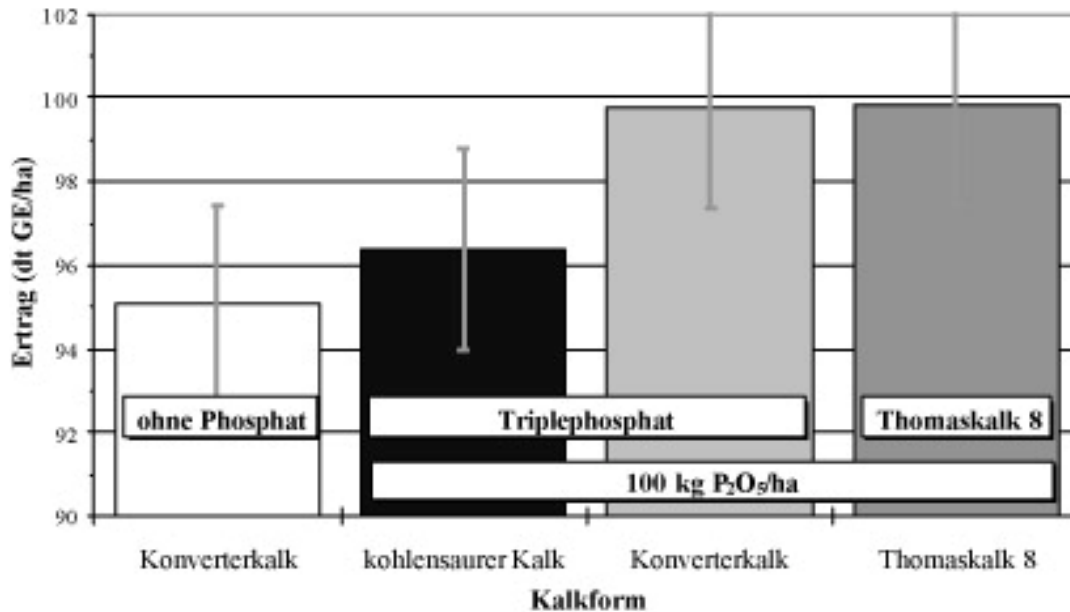
Experimenten (Matichenkov & Bocharnikova, 2001) laten zien dat de hoeveelheid oplosbaar P nauwelijks wordt verhoogd door kristallijne silicaten (Tabel 5.1) in tegenstelling tot silicaatslakken waarin monosiliciumzuur aanwezig is. Het betrof systemen met relatief weinig oplosbaar P. Matichenkov & Bocharnikova (2001) toonden verder aan dat de P-oplosbaarheid voor de vier genoemde P-verbindingen steeg naarmate de concentratie siliciumzuur toenam. In gronden met een hoge adsorptieaffiniteit voor P door de aanwezigheid van veel Al en Fe, leidt toevoegen van Si tot een hogere P-beschikbaarheid (Koski-Vahala et al., 2001). Ook uit experimenten van Rex (2000) blijkt dat het silicaat in slakken (kalkmeststoffen die als bijproduct ontstaan in de ijzerertsindustrie) positief werkt op de fosfaatbeschikbaarheid in de bodem bepaald met calcium-ammonium-lactaat (Figuur 5.1).



Figuur 5.1. Fosfaatmobilisering in de bodem op diverse locaties bij vergelijkbare P-bemesting en CaO-gift (uit Rex, 2000).

Bovendien werd er een hogere opbrengst verkregen bij eenzelfde fosfaatgift in combinatie met verschillende kalken (Figuur 5.2). Echter gezien het niveau van fosfaatbemesting is het zeer de vraag of

het opbrengstverschil tussen koolzure kalk en Konverterkalk met $100 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$ wel toegeschreven kan worden aan een betere werking van fosfaat.



Figuur 5.2. Opbrengstveranderingen door kalk- en fosfaatbemesting op twee proeflocaties over de periode 1991-2000 (uit Rex, 2000)

Daarentegen vonden Ma et al. (2001, 2002) geen duidelijk bewijs dat Si de P-beschikbaarheid in gronden beïnvloedt voor situaties met een lage P-beschikbaarheid. De oorzaak van deze tegenstellingen kan berusten op verschillende Ausgangssituaties en experimentele omstandigheden.

Tabel 5.1. Het effect van verschillende silicasubstanties op de P-oplosbaarheid.

	CaHPO ₄		Ca ₃ HPO ₄		Al(H ₂ PO ₄) ₃		FePO ₄	
	P, µg l ⁻¹	pH	P, µg l ⁻¹	pH	P, µg l ⁻¹	pH	P, µg l ⁻¹	pH
H ₂ O	6,1	7,21	29	6,89	112,4	2,23	163,2	3,83
super fijn silicaat								
300 m ² g ⁻¹	73,0	6,98	28,8	6,89	112,4	2,23	163,2	3,83
30 m ² g ⁻¹	62,4	7,18	30,9	6,91	189,3	2,30	161,8	4,04
kwarts	64,6	7,14	25,6	6,98	-		168,2	3,88
calciumsilicaat-slakken	256,4	5,55	31,0	6,60	206,7	2,21	198,2	3,8

Silicaatmeststoffen en silicaathoudende slakken kunnen P adsorberen. Toevoegen van P-oplossingen (tot concentraties van 10 mg l^{-1}) aan verschillende substanties liet zien dat CaSiO₃ en silica bevattende slakken effectiever P adsorberen dan CaCO₃ en amorf SiO₂ (Matichenkov & Bocharnikova, 2001). Bovendien leidde dit in kolomexperimenten tot een geringere uitspoelingsgevoeligheid van P. Dit ging echter niet koste van de P-beschikbaarheid voor de plant zo gaven extracties met zowel water als zuur aan. Op basis van de resultaten van Matichenkov & Bocharnikova (2001) onder geconditioneerde condities blijkt dus dat bij lage P-gehalten P beter beschikbaar wordt in aanwezigheid van Ca-silicaten en silicaat bevattende slakken (uit de ijzerertsindustrie). Bij hoge gehalten daarentegen verandert de beschikbaarheid voor de plant niet en lijkt door het goede adsorptiegedrag de uitspoelingsgevoeligheid af te nemen.

Siliciumtoediening: effect op beschikbaarheid van P, droogtetolerantie, en ziekteverdraagzaamheid op gras- en maïsland (NMI, 2006)

De vraag is of een verandering in P-beschikbaarheid ook teruggevonden wordt in de P-opname hoeveelheden door het gewas.

5.2 Effect Si op P-opname door het gewas

5.2.1 Gerst en rijst

Dat Si bij diverse gewassen, zoals rijst en gerst, een positief effect op de opbrengst heeft is al lang bekend (Ma & Takahashi, 2002). In de klassieke Broadbalk en Hoosfield experimenten bleek de opbrengst van gerst te Hoosfield te stijgen van 2,03 tot 2,31 ton ha⁻¹ tussen 1868 en 1966 en van 2,94 tot 3,83 ton ha⁻¹ tussen 1968 en 1979 (Dyke, 1980). Over de laatstgenoemde periode gaf Si-bemesting een meeropbrengst van 1,3 ton ha⁻¹ zonder P-bemesting, wat bijna evenveel was als de meeropbrengst die verkregen werd met bemesting met superfosfaat. Op land dat sinds 1852 elk jaar met P werd bemest gaf bemesting met Si gemiddeld 0,4 ton ha⁻¹ meeropbrengst. Bij bemestingen met 96 en 144 kg N ha⁻¹ was het effect groter. Zonder N-bemesting was er een klein effect op de opbrengst. Ook bij proeven met rijst blijkt de P-werking van P-meststof toe te nemen in aanwezigheid van Si.

Lange tijd werd gedacht dat Si de P-beschikbaarheid in gronden verhoogt. Dat hoeft volgens Ma et al. (2001) niet alleen het geval te zijn. In watercultuur experimenten met rijst toonden zij aan dat bij een gebrekkige P-voorziening de aanwezigheid van Si niet zozeer de P-opname maar de translocatie van P in de plant naar de panicle (bloemtop) bevordert (Tabel 5.2). Bij P-concentraties in de watercultuur van 25 en 12,5 µM is de totale P-opname weliswaar iets verhoogd, maar door de hogere opbrengst is het P-gehalte in de plant gelijk of zelfs iets lager bij Si-bemesting. Diverse experimenten, ook bij andere gewassen dan rijst, geven aan dat de hogere P-beschikbaarheid in de plant veroorzaakt wordt door een geringere opname van Mn en Fe bij aanwezigheid van Si (Thiagalingam et al., 1977; Ma et al., 2001; Epstein, 1999; Meyer & Keeping, 2001).

Tabel 5.2. Effect van Si-toediening op groei en opbrengst van rijst bij P-gebrek (uit Ma et al., 2001).

	Si	P-concentratie, µM			
		200	50	25	12,5
scheutgewicht, g ds	-	80,3	68,6	46,9	29,6
	+	79,1	70,8	53,1	35,0
wortelgewicht, g ds	-	9,3	9,9	9,1	7,9
	+	9,4	7,8	6,8	5,5
korrelgewicht, g ds	-	20,8	18,7	15,1	9,1
	+	21,7	22,4	23,4	12,9
P-opname, mg per plant	-	176,2	53,9	29,0	18,4
	+	161,5	53,1	32,9	20,0
snelheid van P-translocatie naar de de panicle, %	-	31,0	46,0	37,0	35,0
	+	29,0	56,0	54,0	50,0

5.2.2 Gras

Er zijn weinig experimentele gegevens beschikbaar waarin het effect van Si op de grasopbrengst is bestudeerd in relatie tot de P-voorziening. In een potexperiment met 22 plantensoorten (waaronder grassen) op een tropische grond (latosol) gaf toediening van calciumsilicaat bij alle soorten een hogere opbrengst tot zelfs van 244 procent bij Bermudagrass. Bij 13 van de 22 soorten was ook het P-gehalte

het hoogst bij de maximale opbrengst. Si-toediening op de savannen in Brazilië gaf een 17 procent hogere drogestofopbrengst van *Brachiaria decumbens* gras (de inheemse grassoorten in Brazilië staan bekend als Si-accumulators) (Korndorfer et al., 2001).

In een experiment met Bahiagrass (*Paspalum notatum* Fluegge) gaf toediening van Ca-silicaat geen hogere opbrengst in tegenstelling tot slakken (Matichenkov et al., 2001). Niet duidelijk is of deze opbrengststijging alleen aan Si is toe te wijzen, of dat deze het gevolg is van de aanwezigheid van micronutriënten in slakken.

in 1988 en 1989 hebben Seo & Lee (1991) grasland, gedomineerd door kropaar, bemest met 0, 150, 300 and 450 kg silicaat ha⁻¹. Dit had geen effect op de opbrengst. Wel gaf silicaatbemesting een hoger ADF-gehalte en een lager hemicellulosegehalte. Er was geen effect op NDF-gehalte, wateroplosbare koolhydraten en drogestofverteerbaarheid. In een ouder experiment van Fassbender & Muller (1967) op een sterk P-fixerende grond gaf toediening van Na-silicaat een lagere opbrengst van Sudangras. Ook Bennett et al. (1954) vonden bij toediening van Na-silicaat geen effect op de opbrengst van grasland. In combinatie met toediening van superfosfaat daalde de opbrengst iets in vergelijking tot toediening van alleen superfosfaat. Dewan & Hunter (1949) vonden bij toediening van Mg- en Na-silicaten na 4 weken een hoger P-gehalte in Sudangras. Dit effect was echter niet blijvend.

Of de opbrengst ook hoger was bij Si-toediening is niet duidelijk.

Het proefmateriaal dat beschikbaar is in de literatuur is veelal afkomstig van tropische grassen. De vraag of Si-toediening gunstig is voor de grasproductie op P-arme gronden in Nederland kan niet eenduidig beantwoord worden. Het is niet ondenkbaar, maar aanvullend onderzoek moet dit uitwijzen.

5.2.3 Maïs

Owino-Gerroh & Gascho (2004) vonden bij proeven met maïs en natriumsilicaattoediening op zure en P-arme gronden een hogere maïsoopbrengst. Zij schrijven dit vooral toe aan de pH-verhogende werking van natriumsilicaat, waardoor de P-sorptie van de grond afneemt. Bovendien zijn de groeicondities beter bij een hogere pH. Op zeer zure en P-arme gronden op de Phillipijnen (Duque & Samonte, 1990) gaf Si-toediening een verhoging van de hoeveelheid beschikbare P in de grond. De efficiëntie van toegediende P nam toe bij toediening van silicaten. De betere opbrengst in deze proeven kan echter mede het gevolg zijn van de opgetreden pH-stijging bij toediening van Si of fosfaat. Er is dan minder schade als gevolg van hoge, beschikbare Al-concentraties in de grond en de P-vastlegging neemt af.

Tuisiri & Blue (1984) vonden daarentegen slechts een beperkt effect van Ca-silicaattoediening aan een sterk verweerde tropische grond (Ultisol). Zij concludeerden dat het saldo-technisch gezien waarschijnlijk niet aantrekkelijk is om Ca-silicaat te gebruiken.

Fassbender & Muller (1967) vonden in kasproeven wisselende resultaten bij toediening van fosfaat plus Si. In een aantal gevallen was de opbrengst duidelijk hoger bij toediening van fosfaat plus Si dan bij alleen toediening van fosfaat. De beste effecten werden verkregen op zure gronden. Dit duidt deels op een pH-effect. In 1966 heeft Bair een onderzoek uitgevoerd naar het gehalte aan Si in maïs. Vastgesteld werd dat in 2 gebieden hoge opbrengsten gepaard gingen met hoge Si-gehalten in de plant. In het algemeen gold dat een hoog gehalte aan oplosbaar Si in de grond ook een hoog gehalte aan Si in de plant betekende. Er werd geen relatie gevonden tussen het Si- en het P-gehalte in het blad. Indien Si vooral het P-transport in de plant verbetert, dan is dat ook niet te verwachten.

Niet alleen op slechte gronden zijn positieve effecten aangetoond. In Korea vonden Han & Kim (1991) in een 3 jaar durende bemestingsproef op jonge, lemige ontginningsgrond (Hapludult, de betere grond

onder de Ultisolen) de hoogste opbrengst bij toediening van fosfaat in de vorm van silicaatfosfaat. Bij een gift van 200 kg N, 150 kg P en 150 kg K ha⁻¹ fosfaatsilicaat waren de opbrengsten respectievelijk 16,88, 17,83 en 18,34 ton ds ha⁻¹ bij toepassing van superfosfaat, magnesiumfosfaat en silicaatfosfaat. Met laatstgenoemde meststof werden ook de hoogste P- en Ca-gehalten in maïs (Han & Kim, 1991) en de hoogste voederwaarde gerealiseerd (Kim & Han, 1991). Ren-Jun et al. (2002) geven aan dat een gift van 90 kg natriummetasilicaat een meeropbrengst van 8,6 procent geeft op chernozem (zwarte aarde) gronden in China. Niet duidelijk is waardoor deze meeropbrengst wordt veroorzaakt: een betere nutriëntenbenutting of een efficiëntere vochtbenutting.

5.3 Effect Si op Al- en Mn-opname door het gewas

Uit de vorige paragrafen blijkt dat Si een positief effect op de opbrengst, de P-voorziening en/of de P-benutting kan hebben. Dat kan verschillende oorzaken hebben, namelijk

- P-beschikbaarheid bodem;
- P-translocatie in de plant;
- pH-effect;
- onderdrukkende/neutraliserende effecten van hoge Al- en Mn-hoeveelheden.

Naast eerstgenoemde effecten (zie paragraaf 5.1 en 5.2.1) kan op zure gronden (zoals in de tropen) het pH-effect een belangrijke rol spelen. Si-meststoffen hebben een basische werking, waardoor de pH stijgt en Al en Mn minder goed oplosbaar worden. Op gronden met een pH-KCl van 4,5 of lager is de opbrengst veelal suboptimaal door een toenemende beschikbaarheid van Al en Mn, waardoor wortelopnameprocessen belemmerd worden. Vrij beschikbaar Si heeft echter ook een direct effect.

Er kunnen Si/Al-complexen ontstaan, waardoor de activiteit van Al in de bodemoplossing afneemt (Ma et al., 1997) of Al adsorbeert of silicaatoppervlakken (Matichenkov & Bournikova, 2001). Dit schijnen echter niet de belangrijkste effecten te zijn. Silicium vermindert ook de opname van Al door de plant (Epstein, 1999), vermindert de remming van de wortelstrekking bij Al-toxiciteit en kan interacties aangaan met Al in de plant (Cocker et al., 1998), waarbij co-depositie van Si/Al optreedt. Hodson & Evans en Cocker et al. (1998) geven meer achtergrondinformatie over mogelijke mechanismen. Bij Mn treden soortgelijke mechanismen op. In de review van Ma et al. (2001) wordt aangegeven dat de aanwezigheid van Si (i) het oxidatievermogen van wortels (zoals bij rijst) kan verhogen, (ii) de verdeling van Mn door de plant kan bevorderen (zie ook Jarvis & Jones, 1987) en (iii) Mn in de plant kan vastleggen in de vorm van Mn/Si-verbindingen.

Het kritisch toxische niveau van Mn en Al in bladweefsel varieert en is daarmee afhankelijk van het Si-gehalte in de plant. De tolerantie voor Al en Mn wordt dus verhoogd door Si.

6 Droogtetolerantie en efficiënt watergebruik

6.1 Algemeen

Voor fotosynthese nemen planten via de huidmondjes (stomata) kooldioxide op en geven ze zuurstof af. Daarbij vindt ook verdamping van water plaats. Deze verdamping is deels ook nodig, want het zorgt voor de koeling van de bladeren. Het verlies aan water wordt gecompenseerd door nalevering vanuit de bodem. Zodra deze nalevering afneemt (bij een droge bodem) sluiten de huidmondjes gedeeltelijk. Vanaf een zekere kritische grens neemt dan de fotosynthese af en daarmee de drogestofproductie. Deze grens is afhankelijk van het ontwikkelingsstadium, van de bodemeigenschappen en van de vochtvraag. De transpiratiecoëfficiënt (het aantal liter (kg)water dat het gewas verdampt voor het produceren van een kg oogstbare droge stof) is een maat voor de efficiëntie waarmee planten met water omgaan. Bij gras bedraagt deze 300-400 kg water per kg droge stof (Smid et al., 1998; Van der Schans et al., 1998), maar kan in de zomer in een warme, droge periode sterk oplopen (tot ongeveer 750 liter water per kg droge stof) (Vandenbosch et al., 2000). Volgens Smid et al. (1998) wordt de transpiratiecoëfficiënt bij gras nauwelijks beïnvloed door de vochtvoorziening. Dit houdt in dat gras bij droogte niet zuiniger omgaat met het beschikbare water. Op zandgrond gaat de verdamping vrijwel ongestoord door tot het water op is en het gewas verwelkt. Beperkingen in de opbrengstvorming door vochttekorten leiden tot een evenredige afname van het vochtverbruik. Er zijn geen verschillen in waterverbruik van grasland vastgesteld bij verschillende niveaus van N-bemesting (Ledieu et al., 1985). Bij gras duurt het bij droogte vrij lang voor de gehele plant afsterft. Hergroei komt na vochttoediening weer snel op gang (Smid et al., 1998), maar bij ernstige droogte kan de zode echter afsterven en neemt het herstellingsvermogen af naarmate de verdroging langer duurt. Soms is dan herinzaai of doorzaai nodig. Op droogtegevoelige zandgrond kan de opbrengstderving door droogte 3 ton ds ha⁻¹ of meer bedragen (Vandenbosch et al., 2000).

Maïs gebruikt minder water dan gras, maar is gevoelig voor droogte, vooral in de periode rond de bloei. Als gemiddelde waarden voor de transpiratiecoëfficiënt worden waarden tussen 160 en 210 per kg ds genoemd (Vandenbosch et al., 2000). De lage waarde is het gevolg van een groot aandeel oogstbare droge stof en een ander fotosynthesesysteem (C4-plant) dan gras (C3-plant). Evenals bij gras wordt de transpiratiecoëfficiënt bij maïs nauwelijks beïnvloed door de vochtvoorziening. Bij maïs is er een rechtlijnig verband tussen drogestofopbrengst en het waterverbruik en zijn verschillen in transpiratiecoëfficiënt tussen jaren klein (Smid et al., 1998). Een goede vochtvoorziening is vooral van groot belang in de periode van 3 weken voor tot 2-3 weken na de vrouwelijke bloei (bepalend voor het succes van de kolfvorming), omdat dan immers geen of weinig kolfvorming plaatsheeft; maar minder belangrijk voor- en nadien (Doorenbos et al., 1986). Een gebrekkige vochtvoorziening tijdens de bloei en of later tijdens de zaadzetting uit zich in een lagere opbrengst, een hoog suikergehalte in de stengel en een lagere voederwaarde. Berekening van maïs op droogtegevoelige gronden verdient zich snel terug (Vandenbosch et al., 2000).

Silicium kan bescherming bieden tegen vochtverlies. Siliciumhoudende structuren in de plant worden phytolieten genoemd. Zoals in paragraaf 3.2 is weergegeven, wordt Si wordt afgezet in de celwand, in de celinhoud en in intercellulaire ruimtes van wortel, stengel of blad. Hoe ouder de plant of het weefsel, hoe hoger het Si-gehalte. Over het algemeen zit er in de wortel het minste, in de stengel wat meer, en in het blad het meeste Si. Silicium kan over lange afstanden worden getransporteerd in het xyleem, en er

wordt relatief veel Si afgezet in wanden van de xyleemvaten. Dit is mogelijk belangrijk voor het tegengaan van compressie bij hogere transpiratie. Epidermale celwanden zijn geïmpregneerd met een siliconenlaag. Dit biedt bescherming tegen teveel waterverlies door transpiratie van de cuticula. Eenmaal in de plant afgezette Si, kan niet gerelokaliseerd worden.

Nagegaan wordt wat er bekend is over de verhoging van de vochtefficiëntie en de droogtetolerantie. Daarbij wordt ook ingegaan op zouttolerantie (een toenemend zoutgehalte betekent immers ook een verminderde beschikbaarheid van water voor de plant). Veel onderzoek naar Si is gedaan bij rijst, maar ook wel bij andere granen (tarwe, gerst, sorghum). Daarom wordt eerst gekeken naar de effecten bij rijst en andere granen om vervolgens nader in te gaan op gras en maïs.

6.2 Rijst

Veel onderzoek naar Si is gedaan bij rijst. Volgens Ma et al. (2001) kan Si vochtstress verminderen door de transpiratie te verlagen. De transpiratie van bladeren wordt gereguleerd door de huidmondjes (stomata) en de cuticula. (Dit is een waslaagje boven op de epidermis van het blad, dat het blad beschermt tegen uitdrogen). Dit waslaagje wordt door de cellen van de epidermis geproduceerd. Bij rijstplanten is deze laag zeer dun. Bij aanwezigheid van Si kan een Si-cuticula dubbellaag ontstaan, waardoor de transpiratie afneemt (Ma et al., 2001). De watergebruiksefficiëntie neemt toe naarmate het Si-gehalte stijgt.

Tabel 6.1. Effect van Si-toediening bij rijst. De transpiratie is gedurende 72 uur gemeten voor rijst met verschillende Si-gehalten (uit Ma et al., 2001).

SiO ₂ -gehalte, %	transpiratie, g H ₂ O g ⁻¹ ds
0,02	200,3
1,59	181,7
10,29	168,0
13,22	154,4

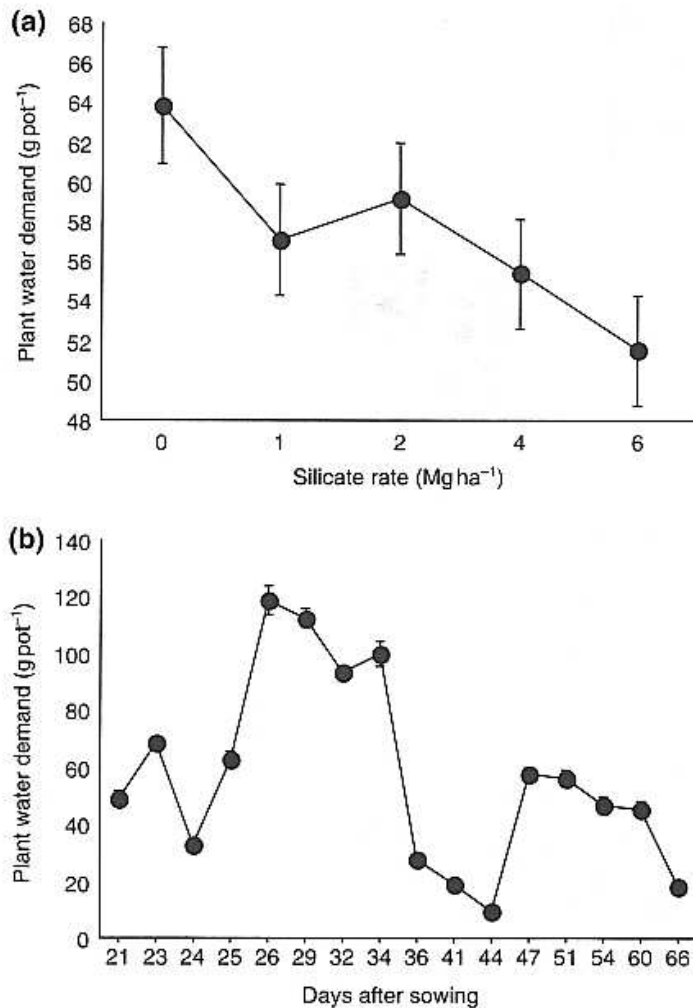
Vochtekort zorgt ervoor dat de huidmondjes dichtgaan, waardoor de fotosynthesesnelheid afneemt. De groei van rijst wordt daardoor meer gestimuleerd in een situatie met een lage relatieve vochtigheid dan bij een hoge relatieve vochtigheid. In alle groeistadia van rijst vermindert Si de transpiratiesnelheid. Ma & Takahashi (2002) laten hiervan diverse voorbeelden zien. Beperkingen van 20-30 procent zijn goed mogelijk. Juist het verminderen van de transpiratiesnelheid bij toediening van Si kan ervoor zorgen dat er minder Na wordt opgenomen door de plant. Bij experimenten met rijst, groeiend in een watercultuur, had toedienen van een NaCl-oplossing bij aanwezigheid van Si een veel geringer negatief effect op de opbrengst dan zonder Si (Matoh et al., 1986).

6.3 Gras

De Melo et al. (2003) hebben in een kassenonderzoek naar het effect van toediening van wollastoniet (CaSiO₃) aan Brachiarragrasen, groeiend op de Braziliaanse savanne. Deze grassen staan bekend om hun Si-accumulerend vermogen, waardoor ze minder last hebben van toxische effecten van hoge Al-, Mn- en Fe-concentraties, beter tegen droge omstandigheden bestand zijn en minder last hebben van ziekten en plagen. Er werd tot 1452 kg Si ha⁻¹ toegediend bij vochtspanningen van respectievelijk 60 en 80 procent van de veldcapaciteit. Toediening van Si leidde wel tot hogere Si-gehalten in het gras (een verdrievoudiging bij de hoogste gift ten opzichte van de controle, maar leidde niet tot een grotere

tolerantie voor watertekorten en had geen effect op de opbrengst, ondanks een 3 maal zo hoge Si-opname. De auteurs veronderstellen dat 60 procent van de veldcapaciteit niet laag genoeg is geweest om het positieve effect van Si tot uitdrukking te brengen.

Eneij et al. (2005) hebben het effect van toediening van calciumsilicaat op de groei en drogestofopbrengst van Rhodesgras (*Chloris gayana*) en Soedan gras (*Sorghum sudanese*) onderzocht voor twee vochtregimes. Daartoe is een potproef uitgevoerd met een organischestofarme zandgrond (vergelijkbaar met onze duinzandgronden), waaraan 0, 1, 2, 4 of 6 ton calciumsilicaat ha^{-1} ($30\% \text{SiO}_2$) werd toegediend en graszaad is ingezaaid. De vochttoestand werd ingesteld op $60 \text{ g H}_2\text{O kg}^{-1}$ (veldcapaciteit) en $30 \text{ g H}_2\text{O kg}^{-1}$ grond. Het vochtgebruik van de grassen bleek omgekeerd evenredig te zijn met de silicaatgift (Figuur 6.1)



Figuur 6.1. Veranderingen in de waterbehoefte van gras: (a) silicaatgift en (b) tijd.

Zonder silicaattoediening werd bij het droge regime bijna 8 procent en bij het natte regime 15 procent meer water verbruikt (gemiddeld over de Si-trappen) oplopend tot 20 procent bij de hoogste Si-trap. Bij Soedangras gaf Si een hogere opbrengst van de bovengrondse delen, oplopend tot 20 procent bij de hoogste Si-gift. De spruitwortelverhouding veranderde ook bij de grassen. De auteurs geven aan dat in deze proef vooral de mogelijkheden van waterbesparing belangrijk zijn en minder de verandering in drogestofopbrengsten. Indien dit ook zou gelden voor Engels raigras dan is dit een belangrijk gegeven. Grasland op droogtegevoelige gronden blijft dan langer groen en is daarmee snel weer in productie bij

neerslag. Er is minder risico van blijvende schade. Bij meer dan 80 procent droog materiaal in de zode neemt het herstellingsvermogen namelijk af naarmate de droge periode langer duurt. Een vuistregel is dat bij meer dan twee weken met 80 procent afsterving moet worden overgezaaid (Van der Schans et al., 1998).

6.4 Tarwe

In 46 Australische veldproeven over 4 groeiseizoenen (Schultz & French, 1976) is gekeken naar het Si-gehalte in de bladtoppen van tarweplanten gedurende de groeicyclus van tarwe. Er kon geen duidelijk effect worden vastgesteld tussen het Si-gehalte en de graanopbrengst. Wel was er een significante correlatie tussen het watergebruik en het Si-gehalte in bladtoppen en het kaf. Daarbij werd 77 procent van de variatie in watergebruik verklaard uit het Si-gehalte in de bladtoppen. Schultz & French (1976) geven aan dat het Si-gehalte echter geen geschikte parameter is voor het vaststellen van de efficiëntie van het watergebruik. Ook Merah et al. (1999) vonden geen duidelijke relatie tussen de graanopbrengst en het Si-gehalte bij watertekorten.

Ook in de recente literatuur wordt een aantal keren gemeld dat Si-toediening de nadelige effecten van vochttekorten vermindert of zelfs opheft. Pandey & Yadav (1999) meten een hogere graanopbrengst in een potproef met tarwe die 2 keer besproeid is met een 100 ppm Si-oplossing in vergelijking tot niet sproeien. De tarweplanten hadden met Si een hoger vochtgehalte en meer productieve scheuten. Opgemerkt moet worden dat het sproeien zelf natuurlijk ook een positieve invloed gehad kan hebben. Om dit effect uit te sluiten had de controle met alleen water besproeid moeten worden. De grootte van de effecten is afhankelijk van de tarwesoort. Een droogtegevoelige soort had meer baat bij de behandeling dan een niet droogtegevoelige soort. Gong-Haijun et al. (2003) vonden in een potproef met tarwe bij een goede vochtvoorziening een hogere drogestofopbrengst bij de behandeling met Si-toediening voor de zaai van tarwe. Het achterwege laten van irrigatiewater gedurende 12 dagen bij 26 dagen oude zaailingen had in de met Si behandelde potten geen effect op de opbrengst, terwijl deze sterk terugliep voor de behandeling zonder Si. Gong-Haijun et al. (2003) suggereren dat Si-toediening een middel kan zijn om de graanproductie in aride en semi-aride gebieden te verhogen. Later stelden Gong-Haijun et al. (2005) vast dat Si de netto assimilatiesnelheid van tarwebladeren verhoogde in een situatie van vochttekorten. Zij vermoeden dat dit wordt veroorzaakt door een beter antioxidant verdedigingsmechanisme, waardoor minder oxidatieschade optreedt. Ook bij een andere graansoort, sorghum, zijn duidelijke effecten van Si gevonden. Onder droge omstandigheden gaf Si-toediening een hogere opbrengst (Hattori et al., 2005). Er kon meer water aan de grond worden onttrokken en de stomatal conductance bleef op een hoger peil dan zonder Si. Onder natte omstandigheden was er geen effect van Si. Zij suggereren dat Si-toediening nuttig kan zijn om de droogtetolerantie van sorghum te verhogen. De betere droogteresistentie wordt toegeschreven aan de silificatie van de endodermis van de plantewortel (Lux et al., 2002)

6.5 Maïs

Bij maïs zijn weinig resultaten bekend van het effect van Si op de droogtegevoeligheid van maïs. In proeven van Gao-XiaoPeng et al. (2004) steeg de watergebruiksefficiëntie met 20 procent bij gebruik van Si-houdend water. Uit een nadere bestudering bleek dat Si de transpiratiesnelheid door de stomata verlaagde. Minder last van droogte kan de belangrijkste reden zijn waarom in potproeven met chernozemgronden tot 8,6 procent (Ren-Jun et al., 2002) hogere maïsopbrengsten werden gevonden bij gebruik van sodiummetasilicaat in hoeveelheden van 0 tot 80 mg kg⁻¹ grond. In een andere, twee jaar

durende veldproef (Zhou-Qing et al., 2002) werd tot 20 procent meeropbrengst gevonden bij toediening van 225 kg Si ha⁻¹. Het betrof een proef met 4 Si-trappen: 0, 75, 150 en 225 kg Si ha⁻¹. Daarbij steeg de opbrengst verder naarmate meer Si werd gebruikt. Opvallend is dat er alleen resultaten uit China zijn. Bij een zeer goede vochtvoorziening neemt de transpiratiesnelheid toe indien Si wordt toegediend. Bovendien kan toediening van hoge concentraties SiO₂ via voedingsoplossing nadelig zijn voor de opbrengst. In een Phillipijnse proef (Nieuwenhuis & Lales, 2001) bleken een concentratie van 400 ppm SiO₂ (2,4 g l⁻¹) opbrengst te kosten in tegenstelling tot 200 ppm.

6.6 Zouttolerantie

De droogte- en de zouttolerantie van gewassen hangen nauw samen. Dit komt omdat in beide gevallen de plant door de hogere osmotische spanning van het bodemvocht grotere weerstand ondervindt om water op te zuigen. De zoutconcentratie is dan ook sterk bepalend voor de vochtopname van gewassen. Bij uitdrogen van grond stijgt de zoutconcentratie. Ook bemesting met meststoffen kan de zoutconcentratie (tijdelijk) sterk doen toenemen en de opname van water bemoeilijken. De zouttolerantie van gewassen verschilt sterk. Maïs is vrij gevoelig voor zout (gevoeliger dan gerst en tarwe). Een beperkte toename van de zoutsterkte kan al een fors effect hebben op de opbrengst (Vandenbosch et al., 2000). De zoutconcentratie wordt in de regel gemeten door het meten van de EC (Electrical Conductivity of elektrische geleidbaarheid) van de oplossing. Deze wordt veelal uitgedrukt uit in mS cm⁻¹, of zelfs µS cm⁻¹, de geleidbaarheid van een oplossing bij meetelektroden die op 1 cm afstand van elkaar staan. In grond wordt deze vastgesteld op basis 1:2 volume-extract.

Zoutstress is vooral bekend uit de aride gebieden. Onder de Nederlandse omstandigheden komt het niet vaak of beperkt voor en is het vaak tijdelijk van aard, zoals kort na een bemesting. De uitzonderingen zijn de gebieden waar verzilting optreedt (door zoute kwel) en in droge warme zomers, waarbij door capillaire opstijging het zoutgehalte van de toplaag kan toenemen. Verzilting wordt gezien als een toenemend probleem. In de gebieden waar dat nu al optreedt kan Si-toediening de nadelige effecten voor gewasgroei mogelijk verminderen (naast andere maatregelen, zoals een andere gewaskeuze die hier verder buiten beschouwing worden gelaten).

In de literatuur wordt voor diverse gewassen gemeld dat Si de nadelige effecten van hoge zoutgehalten in het groeimedium teniet kan doen of sterk kan verminderen. De zouttolerantie verbetert bij gebruik van Si. In een proef van Ahmad et al. (1992) met tarwe nam bij een hogere zoutconcentratie in de bodem, de hoeveelheid natrium (Na) in de plant toe. De Na-concentratie in de plant nam weer af wanneer Si toegevoegd werd, door de verhoogde Si-opname in de wortels. Dit suggereert (zonder dat het direct bewijst) dat oplosbaar Si mogelijk bindt met Na in de wortels, waardoor de verplaatsing van Na naar stam en blad verminderd wordt. Het effect van zout op afrijpen van de zaden en het verschijnen van het blad wordt verminderd door Si, en het droge gewicht van de scheuten nam significant toe wanneer bij 0,6 procent zoutsterkte 20 ppm Si toegevoegd werd aan het groeimedium. Het droge gewicht van de wortels bleef gelijk (Ahmad et al., 1992). Het toevoegen van Si bij aanwezigheid van NaCl reduceert het remmende effect van de zouten. Verder gaat het aantal spruiten omhoog bij toevoegen van Si zowel onder zoute, als onder niet-zoute condities (Ahmad et al., 1992). Trivedi et al. (2004) vinden eveneens een positief effect van Si op de groei van tarwe onder zoute omstandigheden. Toevoegen van Si aan zoute voedingsoplossing leidde tot een sterke vermindering van de groeiremming, vooral door een verlaging van de Na-opname. Het chlorofylgehalte in de plant kon zich herstellen. Liang-YongChao et al. (2003) vond een sterke toename van de enzymactiviteit in gerstplanten met zoutstress bij toevoeging van Si. In een eerder onderzoek van Liang-YongChao (1999) en Liang-YongChao et al. (1996) werd

eveneens aangetoond dat Si de Na-opname verlaagde en de K-opname verhoogde.

De meeste resultaten zijn bekend voor rijst. Si zorgt voor een verlaagde Na-opname in zoute condities (Yeo et al., 1999; Rao, 2000). Bij een rem van de groei door een overmaat aan zout, kan Si dit deels verminderen: Yeo et al. (1999) vonden een groeireductie van 64 procent in plaats van 70 procent bij het toevoegen van Si onder zoute condities. Onder zoute condities verlaagt Si de Na-concentratie in het blad en verhoogt het de assimilatiesnelheid en stomatale geleidbaarheid. Yeo et al. (1999) toonden daarmee aan dat een lagere Na-opname niet veroorzaakt werd door een lagere transpiratie.

7 Bemesting met Silicium

7.1 Reden voor bemesting

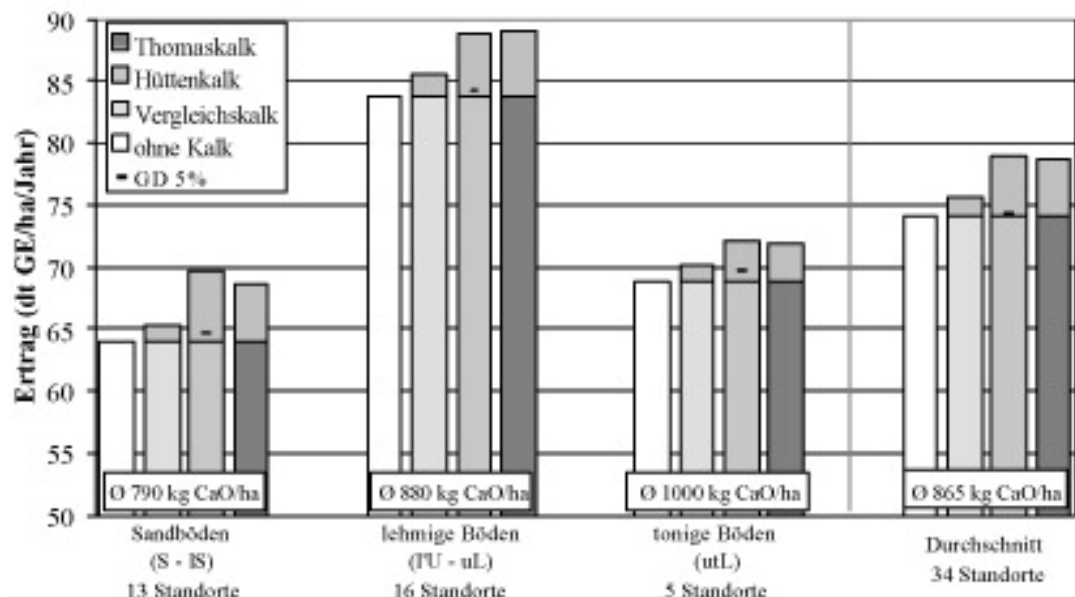
Op basis van het voorafgaande zijn er sterke aanwijzingen dat Si-bemesting een positief effect heeft op de

- fosfaatbeschikbaarheid/benutting;
- resistentie tegen schimmels en plagen;
- droogtegevoeligheid en zoutstress.

Naar verwachting verschilt de beschikbaarheid van Si sterk tussen grondsoorten (hoewel daar weinig Nederlandse informatie over beschikbaar is), met de laagste beschikbaarheid op de zandgronden. Juist op deze gronden kan een hoger gehalte welkom zijn te vermindering van de droogtegevoeligheid en ter verbetering van de resistentie tegen schimmels en plagen. De vraag is dan welke Si-meststoffen komen daarvoor in aanmerking en zijn er duidelijke opbrengsteffecten te verwachten. Daarvoor zal vooral gekeken moeten worden naar het buitenland, daar, voor zover nu bekend, alleen steenmeel verkrijgbaar is in Nederland.

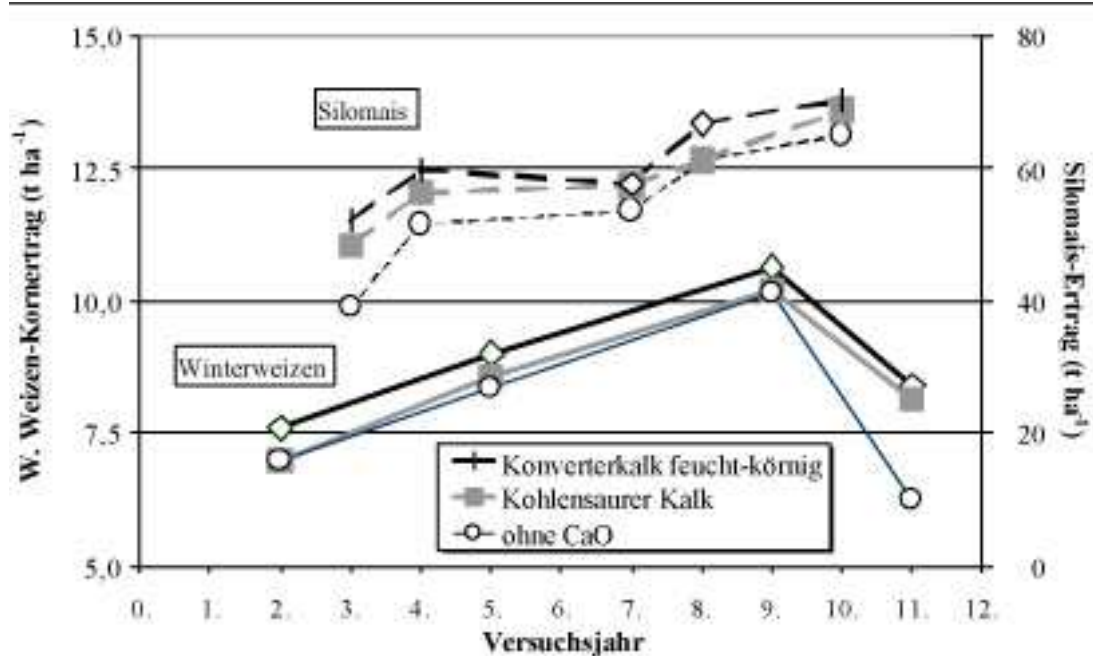
7.2 Effecten van bemesting

In voorgaande hoofdstukken is ingegaan op de positieve effecten van Si met betrekking tot fosfaatbeschikbaarheid, ziekteverendheid en droogtegevoeligheid. Positieve effecten zijn regelmatig aangetoond, maar vaak in het verre buitenland. Er zijn relatief weinig proeven in West-Europa met silicaathoudende meststoffen. Een belangrijke uitzondering hierop zijn proeven met 'slakken' (kalkmeststoffen met een hoog aandeel kiezelzuur). In Duitse veldproeven (Rex, 2000) op 34 locaties gedurende de periode 1975 en 2000 werden bij gebruik van silicaathoudende kalkmeststoffen significant hogere opbrengsten gevonden ten opzichte van normale kalkmeststoffen (Figuur 7.1)



Figuur 7.1. Opbrengst door bekalking met verschillende kalkvormen met (Hüttenkalk, Thomaskalk) en zonder silicaat (Vergleichskalk) (uit Rex, 2000).

Deze proeven zijn vooral met akkerbouwgewassen uitgevoerd. Maar ook uit een voorbeeld van bekalking van maïsland (Figuur 7.2) blijkt dat kalk positief uitwerkt op de maïsopbrengst en dat daarbij silicaathoudende kalk (in deze proef) een hogere opbrengst geeft dan koolzure kalk. De effecten zijn beperkt maar significant (Rex, 2000). Niet duidelijk is of de effecten alleen aan silicium kunnen worden toegewezen of dat de aanwezigheid van sporelementen in de Konverterkalk ook zijn invloed heeft.



Figuur 7.2. Opbrengstontwikkeling van wintertarwe en maïs bij bekalking met Konverterkalk (silicaathoudend), koolzure kalk en zonder kalk te Rösrath over de periode 1989-1999 (uit Rex, 2000).

In een Noors experiment op grasland (Myhr & Erstad, 1996) werd bij toepassing van slakken een iets hogere grasopbrengst verkregen dan bij gebruik van kalk (tot eenzelfde neutraliserende waarde). De in slakken aanwezige zware metalen leidden niet tot hogere zware metaalgehalten in gras. Myhr & Erstad (1996) concluderen dan ook dat slakken een zeer waardevolle kalkmeststoffen kunnen zijn in de landbouw, vooropgesteld dat de aanwezige zware metalen niet schadelijk zijn voor bodem en plant, zowel op de korte als lange termijn.

7.3 Meststoffen

Silicium komt voor in organische meststoffen. Daarnaast zijn er specifieke minerale Si-meststoffen, maar zijn er ook minerale meststoffen waarin Si een nevenbestanddeel is.

Organische meststoffen

Dierlijke mest is de belangrijkste meststof op het melkveebedrijf. In mest zal Si vooral aanwezig zijn in de organische component en slecht beschikbaar zijn. Daarnaast wordt de hoeveelheid en beschikbaarheid van Si in mest sterk bepaald door de hoeveelheid Si in het voer. Er is geen informatie beschikbaar over het Si-gehalte in mest.

Compost

Voor in rijstproducerende landen is compost lange tijd de belangrijkste Si-meststof geweest (Ma & Takahashi, 2002). Vermoedelijk bestond de compost vooral uit rijstafval. In Nederland staan heel andere grondstoffen aan de basis van compost. Verwacht wordt dat er in compost weinig gemakkelijk

beschikbaar silicium aanwezig is. Kwantitatieve informatie hierover ontbreekt echter.

Minerale meststoffen

Voorbeelden van minerale meststoffen zijn

- steenmeel;
- kiezelzuur;
- slakken met calciumsilicaat;
- calcium-, kalium- en natriumsilicaat;
- silicagel.

Steenmeel is een bodemverbeteraar die in de biologische landbouw wordt gebruikt. Vaak zijn steenmeelsoorten afkomstig van vulkanisch gesteente. De fijnheidsgraad is van invloed op de werking. Kwantitatieve gegevens over de werking van steenmeel zijn nauwelijks voorhanden. De verwachting is dat de beschikbaarheid van Si in steenmeel laag is. Voor een betere beschikbaarheid moet de Si als het ware eerst ontsloten worden.

Kiezelzuur is een zwak zuur dat afgeleid is van siliciumdioxide (SiO_2). In oplossing zijn er meerdere vormen die allemaal de algemene formule $\text{SiO}_2 \cdot n \text{H}_2\text{O}$ bezitten, waarbij n kan verschillen (voorbeelden: H_2SiO_3 , H_4SiO_4 en $\text{H}_6\text{Si}_2\text{O}_7$). Van de verschillende vormen van kiezelzuur zijn er vele zouten, de silicaten. De meeste daarvan zijn onoplosbare verbindingen die een groot deel van de aardkorst uitmaken. De silicaten van natrium en kalium zijn echter wel oplosbaar. Silicaat wordt verkregen door kwartszand met potas (K_2O) en koolzuur natriumcarbonaat (Na_2CO_3) te smelten. Dit is in water oplosbaar. Volgens Matichenkov et al. (2001) zou Si-bemesting op bijna alle bodems nut hebben, uitgezonderd bodems met een extreem hoog Si-gehalte. Naast hogere fosfaatbeschikbaarheid in de bodem, een betere droogte- en zouttolerantie en een hogere weerstand tegen ziekten is het ook van invloed op de regulatie van snelle en duurzame kalkwerking, stabilisatie duurzame verkruiemeling van de bodem. Hierdoor ontstaat betere verdeling van lucht en water, waardoor de opname van nutriënten beter wordt.

Een bijproduct van de ijzerertsindustrie zijn de slakken. Bij het smelten van ijzererts worden kalk en cokes gebruikt. Silicacomponenten in het erts gaan een reactie aan met de kalk. Dit leidt tot een scheiding in calciumsilicaat, ijzer en eventuele andere metalen in het erts. Zo wordt het ijzer geconcentreerd en afgescheiden. Het bijproduct, de slakken, bevat naast kalk en calciumsilicaat, metalen als Fe, Mg en Na en geringe hoeveelheden andere (zware) metalen. Veelal bevatten deze producten (veel) meer dan 10 procent SiO_2 . In Duitsland zijn het gangbare kalkmeststoffen, die onder namen als Hüttenkalk, Konverterkalk en Thomaskalk op de markt zijn. Daarbij wordt uitdrukkelijk gewezen op de positieve aspecten van het in de kalk aanwezige silicaat. De genoemde producten mogen op dit moment in Nederland niet verkocht worden, onder andere vanwege de nu nog geldende fijnheideisen van kalkmeststoffen. Een discussiepunt is bovendien het gehalte aan zware metalen.

In 1978 kwam calciumsilicaat beschikbaar als een slow-release K-meststof (Ma & Takahashi, 2002). Het ontstaat door vlieggas te mengen met kaliumcarbonaat of kaliumhydroxide en magnesiumhydroxide te mengen bij een temperatuur van ongeveer 900°C . In Japan moet deze meststof 20 procent citraat oplosbaar K_2O , 25 procent 0,5 M HCl oplosbaar SiO_2 , 3 procent citraat oplosbaar MgO en minder dan 3 procent niet reactief wateroplosbaar K_2O bevatten. De beschikbaarheid van deze meststof is waarschijnlijk beperkt tot de rijstverbouwende landen. Verder is er nog poreus calciumsilicaathydraat uit

de bouwindustrie. In Japan moet deze meststof 25 procent 0,5 M HCl oplosbaar SiO_2 en meer dan 15 procent basische componenten bevatten.

Kaliumsilicaat is een meststof die verkrijgbaar is in Europa. Deze wordt nu vooral gebruikt in de tuinbouw.

Silicagel is vooral bekend vanwege zijn vochtonttrekkende eigenschappen. In Japan wordt dit product ook wel gebruikt bij rijstzaailingen. Het moet dan 80 procent 0,5 N NaOH oplosbaar SiO_2 bevatten (Ma & Takahashi, 2002).

8 Silicium in diervoeding

8.1 *Silicium in het dier*

Bij melkvee heerst er eigenlijk nooit een tekort aan Si, en Si is dan ook vaker in overmaat aanwezig dan als tekort, zelfs bij producten die relatief siliciumarm zijn, zoals dicotylen (Underwood & Suttle, 1999). Te veel Si in een plant kan zelfs leiden tot beschadigingen van de penswand (Marschner, 1995).

Si in hooi is slecht opneembaar voor het dier, maar uit vers gras is het waarschijnlijk beter opneembaar. Si wordt dan voornamelijk uitgescheiden in de urine. Si die als amorf Si in planten zit, kan mogelijk onveranderd in de darm geabsorbeerd worden en kan dan in de lymfeknopen terecht komen, of in deze vorm met de urine uitgescheiden worden. Absorptie garandeert dan ook niet dat er voldoende bruikbaar Si is opgenomen: de geabsorbeerde Si wordt snel weer uitgescheiden, en de concentratie in bloed reflecteert de geabsorbeerde hoeveelheid niet.

Een hoge opname kan een negatief effect op diergezondheid en voeding hebben. Si kan complexen vormen met magnesium, ijzer en mangaan, waardoor deze slechter verteerbaar zijn wanneer er veel Si in het rantsoen zit. Dit komt bovenop het effect van de lage verteerbaarheid die er waarschijnlijk al was bij ruwvoer met zulke hoge Si-gehalten. Een hoog gehalte aan Si in de voeding kan leiden tot problemen met de urinewegen (nierstenen), wat ook afhankelijk is van urinevolume en pH. Si-rijke nierstenen bestaan uit polysiliciumzuur en eiwit. Deze worden minder snel gevormd bij een hoog fosfaatgehalte en een lage pH (Underwood & Suttle, 1999).

8.2 *De voeropname*

Zoals aangegeven heeft het toedienen van beschikbaar Si een aantal positieve effecten op de gewasgroei. Dat is echter niet het enige dat telt. Van belang is om na te gaan of een verhoogde Si-opname door gewassen niet leidt tot een lagere voederwaarde en/of een lagere voeropname.

Si wordt algemeen gezien als een factor die hierop van invloed is. Si-opname via het voer kan leiden tot een reductie in de microbiële toegankelijkheid tot celwandstructuren (Smith & Nelson, 1975; Harbers et al., 1971). Daardoor kan de schijnbare verteerbaarheid van ruwvoer verminderen (Van Soest & Jones, 1968; Smith et al., 1971). Zowel totaal Si-gehalte maar belangrijker nog oplosbaar Si verminderen de in-vivo-verteerbaarheid. Wateroplosbaar Si remt de cellulaseactiviteit en andere verteringsenzymen. Daarentegen zijn de onoplosbare vormen chemisch inert (Mika, 1986; Shimojo & Goto, 1985). Opvallend is dat er in het algemeen overeenstemming is dat Si de voederwaarde vermindert, maar dat er maar weinig studies zijn waarin de bijdrage van Si simpelweg is beschouwd als een inert component (Shewmaker et al., 1989). Om hieraan tegemoet te komen dient de verteerbaarheid op asvrije basis te worden gerapporteerd (dit is in Nederland het geval).

Naast een eventueel effect op de verteerbaarheid is de voeropname van belang. Shewmaker et al. (1989) hebben proeven uitgevoerd met schapen om de voorkeur bij beweiding vast te stellen. Er kon geen enkel verband worden afgeleid tussen het gehalte oplosbaar Si of onoplosbaar Si in de ADF en NDF. De voorkeur voor bepaalde grassen werd door andere factoren bepaald. Truscott & Currie (1989) hebben beweidingproeven met Hereford stieren uitgevoerd met 'bluebunch wheatgrass' en kweek. Er kon geen eenduidig verband tussen het Si-gehalte en de beweidingvoorkeur (via happen tellen) worden vastgesteld. Ook Mayland & Shewmaker (2001) konden geen enkel verband tussen beweidingvoorkeur en gehalte oplosbaar Si of onoplosbaar Si in de ADF en NDF vaststellen. Zij stellen

Siliciumtoediening: effect op beschikbaarheid van P, droogtetolerantie, en ziekteveerbaarheid op gras- en maïsland (NMI, 2006)

dat andere factoren de voorkeur bepalen.

Op basis van het voorgaande lijken er voedingstechnisch niet direct bezwaren te zijn voor een verhoging van het Si-gehalte van gras. Nader onderzoek moet dit uitwijzen. Anderzijds kan monitoring van het Si-gehalte in gras in relatie tot verteerbaarheid voor de Nederlandse situatie op de diverse grondsoorten mogelijk ook al veel informatie geven. Immers grondsoort heeft een groot effect op de Si-opname (Schnug & Von Franck, 1985), met de hoogste gehalten op de kleigronden.

9 Discussie

Het gebruik van silicium in de landbouw vindt vooral plaats bij de teelt van rijst en suikerriet, maar ook bij een aantal tuinbouwgewassen onder glas, vanwege diverse positieve effecten waaronder een verbetering van de

- fosfaatbeschikbaarheid;
- droogtetolerantie (en zouttolerantie);
- weerstand tegen plantenziekten.

Via literatuuronderzoek is nagegaan in hoeverre deze effecten van Si mogelijk ook van toepassing zijn bij de teelt van gras en maïs. Daarbij is ook gekeken naar factoren die van invloed zijn op de Si-beschikbaarheid. Er is vooral geput uit buitenlandse informatie. De hoeveelheid gegevens omtrent positieve effecten van Si voor de teelt van gras en maïs was echter beperkt. Daarom is ook gekeken naar andere grasrassen dan die in Nederland voorkomen of is gekeken naar grasachtigen zoals de granen.

Hoewel Si in grote hoeveelheden voorkomt in gronden is de beschikbaarheid maar laag. De Si-concentratie in de bodemoplossing bedraagt 3,5 tot 40 mg l⁻¹ (Marschner, 1995). De beschikbaarheid is in zijn algemeenheid het laagst op de zandgronden en het hoogst op de kleigronden. De beschikbaarheid wordt beïnvloed door temperatuur en vochtgehalte. Naarmate deze hoger zijn neemt de beschikbaarheid toe. Ook een lagere pH geeft een hogere Si-beschikbaarheid onder Nederlandse condities. Bekalken verlaagt de beschikbaarheid van Si, tenzij Si-houdende kalken worden gebruikt (Converterkalk, Hüttenkalk), die ontstaan bij de ijzerertsproductie. Het effect van organische stof op de Si-beschikbaarheid is niet duidelijk. De redoxpotential is ook van invloed. Een lage redoxpotential (zoals bij gronden die onder water staan) is gunstig voor de Si-beschikbaarheid. Deze situatie komt voor bij de natte rijstteelt. Resultaten verkregen met Si bij de teelt van rijst kunnen dus niet zonder meer vertaald worden naar de Nederlandse situatie.

De variatie in Si-gehalten van planten is groot. In klaver is deze in het algemeen laag (rond de 0,1 procent). In gras kan deze sterk variëren van enkele promillen tot enkele procenten. In granen kunnen enkele procenten Si aanwezig zijn. Hierover is echter weinig Nederlandse informatie voorhanden.

Uit de beschikbare informatie blijkt dat Si een rol speelt bij de ziekteresistentie. De laatste jaren komt er ook meer informatie beschikbaar met betrekking tot gras en maïs. Zo onderdrukt Si de aantasting van grijze bladplekkenziekte in Engels raaigras. Ook bij diverse andere grassen werden positieve effecten gevonden van Si-toediening op de ziektedruk. Er is geen informatie beschikbaar in hoeverre kroonroest, de belangrijkste schimmelaantasting in gras, wordt onderdrukt door hogere Si-gehalten. Ook niet duidelijk is hoe hoog de Si-opname moet zijn voor een substantiële vermindering van de ziektegevoeligheid.

Maïs is in vergelijking tot gras betrekkelijk ongevoelig voor schimmelaantasting. Gegevens over Si en ziektedruk in maïs zijn er dan ook vrijwel niet.

In het algemeen leidt meer beschikbaar Si tot een hogere beschikbaarheid van P in de grond, vooral bij lage P-gehalten. Dit hoeft niet te betekenen dat de P-opname door het gewas hoger is. Veeleer leidt Si tot een betere translocatie van P in de plant. Dit zou veroorzaakt worden door een geringere opname van Mn en Fe bij aanwezigheid van Si. Opbrengsteffecten bij granen worden aangetroffen in situaties van lage P-toestanden, vooral veroorzaakt door een betere translocatie. De opbrengstresultaten bij gras

zijn wisselend. Soms is er een positief effect op de opbrengst, soms niet. Positieve effecten zijn mogelijk ook toe te schrijven aan een betere spooreslementvoorziening, als gevolg van de aanwezigheid van spooreslementen in veel Si-meststoffen, zoals slakken.

Bij maïs worden soms ook positieve effecten gevonden. Vaak zijn deze toe te schrijven aan de pH-verhoging die optreedt bij gebruik van bijvoorbeeld slakken of andere silicaten. Anderzijds worden er op niet zure gronden ook positieve opbrengsteffecten gemeld. Niet duidelijk is waardoor deze meeropbrengst wordt veroorzaakt: een betere nutriëntenbenutting of een efficiëntere vochtbenutting. De watergebruiksefficiëntie neemt toe naarmate het Si-gehalte stijgt. Dit is aangetoond bij rijst maar ook bij gras, tarwe en maïs, al uit zich dit niet altijd in een hogere drogestofopbrengst onder droge omstandigheden. Tegelijkertijd zijn er resultaten dat de zouttolerantie verbetert bij gebruik van Si. Dit effect is voor een deel verstrengeld met droogte.

De centrale vraag zou nu kunnen zijn: moeten wij nu in Nederland ook maar Si gaan gebruiken bij de teelt van gras en maïs? Deze vraag kan op dit moment niet afdoende beantwoord worden, hoewel Si zeker positieve effecten heeft. Daar is een aantal redenen voor:

- 1) Niet duidelijk is wat de Si-beschikbaarheid is van Nederlandse gronden en welke Si-gehalten in gewassen worden aangetroffen.
- 2) Er zijn (nog) geen duidelijke criteria op basis waarvan besloten kan worden of Si-bemesting zinvol is.
- 3) De kosten en de voordelen dienen nader te worden gewogen.

In Nederland wordt het gehalte oplosbaar Si in grond en het Si-gehalte in gras en maïs niet vastgesteld. Bekend is wel dat er verschillen te verwachten zijn. Naarmate de grond meer klei bevat is er in het algemeen meer Si beschikbaar (Schwandes et al., 2001, Zhang, 1987). Schnug & Von Franck (1985) vonden de laagste Si-gehalten in granen geteeld op podsolen, gevolgd door bruine bodems en Marschgronden (gronden langs de kust, klei bevattend). Om het Si-gehalte in grond te bepalen zijn diverse technieken beschikbaar (Snyder, 2001). Daarbij is extractie met 0,01 M CaCl_2 een interessante optie. Deze gaf namelijk bij suikerriet de beste relatie met de gewasopbrengst. Kennelijk is deze extractie dus een goede maat voor de beschikbaarheid van Si. In Nederland wordt extractie met 0,01 M CaCl_2 meer en meer gangbaar en deze blijft niet beperkt tot universiteitslabs. Voor de hand ligt om via monitoring vast te stellen welke verschillen in Nederland worden aangetroffen. Deze gegevens dienen dan tegelijk gerelateerd te worden aan gemeten totaalgehalten in gras en maïs. Voor maïs kan dit door maïskuilen te bemonsteren. Graskuilmonstering is niet goed mogelijk, want een graskuilmonster bevat vaak ook zand. Bij gras dient daarom bij voorkeur vers gras te worden bemonsterd.

De informatie over de variatie in het Si-gehalte in het gewas is ook belangrijk vanuit oogpunt van veevoeding. Op basis van de bandbreedte in Si-gehalten in het gewas kan beoordeeld worden of er effecten te verwachten zijn op de verteerbaarheid en of deze in het niet vallen in vergelijking tot de variatie in asrest in graskuil. In graskuil wordt namelijk regelmatig meer of minder zand aangetroffen als gevolg van molshopen en of te laag maaien (op niet vlakliggende percelen). Om vervolgens te beoordelen of Si-bemesting zinvol kan zijn dient vastgesteld te worden of variatie in Si-gehalte te koppelen is aan een geringere droogtegevoeligheid bij gras en maïs of minder last van kroonroest bij gras of een betere P-beschikbaarheid op locaties met een lage P-toestand. Via observationeel onderzoek kan dit mogelijk worden vastgesteld, al dan niet in combinatie met een Si-houdende meststof of andere producten met oplosbaar Si.

Met betrekking tot de droogtegevoeligheid kan op grasland vastgesteld worden of het gras langer groen blijft c.q. minder snel verdroogt bij aanwezigheid van oplosbaar Si en of de grasgroei sneller op gang komt na een periode van droogte. Dergelijke effecten zijn overigens eenvoudiger en sneller te toetsen in een laboratoriumopstelling. Effecten dienen bij voorkeur te worden getoetst op zandgrond omdat droogtegevoeligheid vooral op zandgrond voorkomt. Tegelijk zijn dit de gronden (podsolen) met het laagste Si-gehalte (Schnug & Von Franck, 1985). Bij maïs zijn effecten van een geringere droogtegevoeligheid niet minder belangrijk. Droogte kan leiden tot een slechtere kolfzetting en korrelvulling. Niet alleen de opbrengst neemt dan af maar ook de voederwaarde. Beregening in maïs vindt niet zo vaak plaats. Bij maïs kan op droogtegevoelige locaties het effect van wel of geen toedienen van oplosbaar Si worden gevolgd door de gewasgroei te monitoren (bijvoorbeeld kolfzetting en kolfvulling) en bij de eindoogst de opbrengst en de voederwaarde te bepalen.

Kroonroest is de belangrijkste schimmelaantasting op grasland. Hoewel er in de literatuur geen informatie is gevonden over de relatie tussen kroonroest en Si, zijn er voor diverse andere schimmels bij andere grassen en grasachtigen wel aantasting onderdrukkende effecten aangetoond bij gebruik van oplosbaar Si. Dit maakt het de moeite waard om het effect op kroonroest nader te bestuderen, zeker met een krappere wordende N-bemesting. Bij een afnemende N-bemesting neemt de groeisnelheid in het najaar verder af, met als gevolg een grotere kans op aantasting door kroonroest. Via de veredeling wordt weliswaar gewerkt aan een betere resistentie tegen kroonroest, maar Si kan mogelijk ook een waardevolle bijdrage leveren. Met betrekking tot het vaststellen van het effect van Si op de onderdrukking van kroonroest dienen eerst locaties te worden geselecteerd die bekend staan om hun gevoeligheid voor kroonroest. Een behandeling van een deel van deze locaties met oplosbaar Si moet uitwijzen of het onbehandelde deel een hogere aantasting heeft dan het behandelde deel. Dit kan meer dan één seizoen in beslag nemen vanwege de van jaar tot jaar optredende verschillen in kroonroest - aantasting. Een test in een laboratoriumopstelling heeft daarom de voorkeur.

De beschikbaarheid van P is nu in veel gevallen nog goed tot zeer goed. De enige uitzondering vormen de fosfaatfixerende gronden, zoals die bijvoorbeeld bij beekdalen nog in beperkte mate voorkomen. Deze gronden worden gekenmerkt door de aanwezigheid van veel ijzer, aluminium en mangaan. Dit zijn bij uitstek dan ook geschikte locaties om te testen of oplosbaar Si bijdraagt (door een betere translocatie) aan een betere grasgroei bij suboptimale of helemaal geen P-bemesting.

Op basis van bovenstaande bevindingen wordt het perspectief duidelijk van Si-bemesting. Immers een geringere droogtegevoeligheid betekent een geringere noodzaak van beregening maar ook een geringer risico van veronkruiding (het voorkomen van slechte grassen) op grasland en schade aan de grasmat bij berijding. Beregening op droogtegevoelig grasland kan maar net uit, op droogtegevoelig maïsland kan beregening financieel gezien vaak wel uit (Vandenbosch et al., 2000). Minder kroonroest komt de smakelijkheid en de voederwaarde van het gras ten goede. De kwaliteit van herfstgras en opname van herfstgras door de veestapel verbetert daarmee. Dit perspectief dient afgezet te worden tegen een eventueel lagere voederwaarde en/of smakelijkheid door meer Si (waar in de literatuur weinig aanwijzingen voor zijn). Een betere P-beschikbaarheid in de plant is gunstig voor de opbrengst bij suboptimale P-bemesting of lage P-toestanden.

De omvang van de vast te stellen effecten in combinatie met de kosten van Si-bemesting bepaalt of Si-bemesting zinvol is. De kosten van Si-meststoffen zijn op dit moment niet bekend. Indien echter gebruik gemaakt wordt van Si-houdende kalken, is de verwachting dat er nauwelijks of geen meerkosten zijn. In

dat geval bepaalt puur het effect van Si of Si-bemesting zinvol is. Si-houdende kalken mogen op dit moment niet worden toegepast in Nederland.

Zowel met betrekking tot droogtetolerantie, ziektedruk als vanuit oogpunt van P-beschikbaarheid lijken er perspectieven te zijn voor het gebruik van oplosbaar Si. Om eventuele effecten te kunnen kwantificeren is aanvullend oriënterend onderzoek nodig. De volgende (globale) aanbevelingen worden daartoe geformuleerd:

- Stel via monitoring vast welke Si-gehalten in grond (beschikbaar) en gras en maïs (totaal) worden aangetroffen en bestudeer het verband tussen het Si-gehalte in grond en gewas en bestudeer de voederwaardekenmerken.
- Monitor/analyseer de droogtetolerantie van Engels raaigras bij gebruik van wel of geen oplosbaar Si in een eenvoudige potproef en eventueel in een veldproef.
- Bestudeer de droogtetolerantie van maïs bij gebruik van wel of geen oplosbaar Si voor een aantal praktijksituaties op droogtegevoelige zandgrond.
- Stel het effect van Si op de P-beschikbaarheid vast voor fosfaatarme beekdalgrond. Dit kan zowel op basis van een potproef met gras als via monitoring van de grasopbrengsten en grassamenstelling van de eerste snede in een beperkte veldproef. In het veld kan ook het gewas maïs worden getoetst.
- Bestudeer het effect van wel of geen oplosbaar Si op grasland op de aantasting van gras door kroonroest op meerdere locaties, waarvan bekend is dat deze gevoelig zijn voor kroonroest.

Door een slim ontwerp zijn de effecten van Si op droogtetolerantie, kroonroestaantasting en P-beschikbaarheid bij gras mogelijk in één proef vast te stellen.

10 Literatuur

- Ahmad R, Zaheer SH & Ismail S (1992) Role of silicon in salt tolerance of wheat (*Triticum aestivum* L.). *Plant Science* 85: 43-50.
- Bair RA (1966) Leaf silicon in sugarcane, field corn and St. Augustinegrass grown on some Florida soils. *Proc Soil Sci Soc Fla.* 26: 64-70.
- Bennett OL, Longnecker TC & Gray CA (1954) Comparison of the efficiency of eighteen sources of phosphate fertilizers on Houston black clay. *Soil Sci Soc Amer Proc.* 18: 408-4.
- Brecht MO, Datnoff LE, Kucharek TA, Nagata RT (2004) Influence of silicon and chlorothalonil on the suppression of gray leaf spot and increase plant growth in St. Augustinegrass. *Plant Disease* 88: 338-344.
- Brown TH & Mahler RL (1987) Effects of phosphorus and acidity on levels of silica extracted from a Palouse silt loam. *Soil Science Society of America Journal* 51: 674-677.
- Chérif M, Asselin A & Belanger RR (1994) Defense responses induced by soluble silicon in cucumber roots infected by *Pythium* spp. *Phytopathology* 84: 236-242.
- Cocker KM, Evans DE & Hodson MJ (1998) The amelioration of aluminium toxicity by silicon in higher plants : solution chemistry or an in planta mechanism? *Physiology Plantarum* 104: 608-614.
- Curtin D & Smillie GW (1986) Effects of liming on soil chemical characteristics and grass growth in laboratory and long-term field-amended soils. I. Soil chemistry. *Plant and Soil* 95: 15-22.
- Datnoff LE (2005) Silicon in the life and performance of turfgrass. Online. *Applied Turfgrass Science* doi:10.1094/ATS-2005-0914-01-RV.
- Datnoff LE & Nagata RT (1999) Influence of silicon on gray leaf spot development in St. Augustinegrass. *Phytopathology* 89: S19.
- Datnoff LE & Rodrigues FA (2005) The role of silicon in suppressing rice diseases. Online. February APSnet Feature. American Phytopathological Society, St. Paul, MN.
- Datnoff LE & Rutherford BA (2004) Effects of silicon on leaf spot and melting out in bermudagrass. *Golf Course Manage* 5: 89-92.
- De Melo SP, Korndörfer GH, Korndörfer CM, Korndörfer GH, Lana RMQ & De Santana DG (2003) Silicon accumulation and water deficit tolerance in *Brachiaria* grasses. *Scientia Agrivola* Vol 60: 755-759.
- Dewan ML & Hunter AS (1949) Absorption of P by soybeans and Sudan grass: II. Effect of silicates. *Soil Sci.* 68: 479-482.
- Doorenbos, J et al. (1986) Yield Response to Water. *FAO Irrigation and Drainage Paper* 33. FAO, Rome, 193 pp.
- Duque CM & Samonte HP (1990) Influence of silicate and sulfate on phosphorus sorption and yields of corn. *Philippines Agriculturist* 73: 35-46.
- Dyke GV (1980) Field experiments section. UK, Rothamsted Experimental Station: Report for 1979, Part-1: 101-107.
- Eneij E, Inanaga S, Muranaka S, Li J, An P, Hattori T & Tsuji W (2005) Effect of calcium silicate on growth and dry matter yield of *Chloris gayana* and *Sorghum sudanense* under two soil water regimes. *Grass & Forage Science* 60: 393-398.
- Epstein E (1994) The anomaly of silicon in plant biology. *Proc Natl. Acad. Sci USA* 91, 11-17.
- Epstein E (1999) Silicon. *Annu Rev Plant Physiol Plant Mol Biol* 50: 641-664.
- Epstein E (2001) Silicon in plants: Facts vs. concepts. In: Datnoff LE, Snyder GH & Korndörfer GH (Eds). *Silicon in Agriculture. Studies in Plant Sciences* 8. Elsevier Science, Amsterdam, 1-15.
- Fassbender HW & Muller L (1967) Use of silicate amendments in soils of high phosphorus-fixing.

- capacity. I. Effect of sodium-meta-silicate applications. *Turrialba* 17: 371-375.
- Fawe A, Abou-Zaid M, Menzies J G & Belanger RR (1998) Silicon-mediated accumulation of flavonoid phytoalexins in cucumber. *Phytopathology* 88(5): 396-401
- Fawe A, Menzies JG, Chérif M & Belanger RR (2001) Silicon and disease resistance in dicotyledons. In: Datnoff LE, Snyder GH & Korndörfer GH (Eds). *Silicon in Agriculture. Studies in Plant Sciences* 8. Elsevier Science, Amsterdam, 159-169.
- Gao XiaoPeng, Zou ChunQin, Wang LiJun & Zhang-FuSuo (2004) Silicon improves water use efficiency in maize plants. *Journal of Plant Nutrition* 27: 1457-1470.
- Gladkova KF (1982) The role of silicon in plant nutrition. *Agrochemistry* 2: 133
- Gong HaiJun, Chen KunMing, Chen GuoCang, Wang SuoMin & Zhang-ChengLie (2003) Effects of silicon on growth of wheat under drought. *Journal of Plant Nutrition* 26: 1055-1063.
- Gong HaiJun, Zhu XueYi, Chen KunMing, Wang SuoMin & Zhang ChengLie (2005) Silicon alleviates oxidative damage of wheat plants in pots under drought. *Plant Science* 169: 313-321.
- Gussack E, Petrovic M & Rossi F (1998) Silicon: The universal contaminant. *Turfgrass Times* 9: 9-11.
- Hall AD & Morrison CGT (1906) On the function of silica in the nutrition of cereals. *Proceedings of the Royal Society London Series B* 77:455.
- Han MS & Kim JG (1991) Effect of silicate phosphate fertilizer on silage maize grown on newly reclaimed red-yellow soils. 1. Changes in the mineral component and yield performance of silage maize. *Research Reports of the Rural Development Administration, Livestock* 33: 46-51
- Harbers LH, Ralten DJ & Paulsen GM (1981) The role of plant epidermal silica as a structural inhibitor of rumen microbial digestion in steers. *Nutr. Rep. Int* 24: 1057-1066
- Hattori T, Inanaga S, Araki H, An P, Morita S, Luxová M & Lux A (2005) Application of Silicon enhanced drought tolerance in *Sorghum bicolor*. *Physiologia Plantarum* 123: 459-466.
- Haysom MBC & Chapman LS (1975) Some aspects of the calcium silicate trials at Mackay. *Proceedings of the 42nd Conference, Queensland Society of Sugar Cane Technologists*, 117-122
- Heath MC (1981) Insoluble silicon in necrotic cowpea cells following infection with an incompatible isolate of the cowpea rust fungus. *Physiological Plant Pathology* 19: 273-276.
- Hodson ME & Evans DE (1995) Aluminium/silicon interactions in higher plants. *Journal of Experimental Botany* 46: 161-171.
- Ishiguro K (2001) Review of research in Japan on the roles of silicon in conferring resistance against rice blast. In: Datnoff LE, Snyder GH & Korndörfer GH (Eds). *Silicon in Agriculture. Studies in Plant Sciences* 8. Elsevier Science, Amsterdam, 277-291.
- Jarvis SC (1987) The uptake and transport of silicon by perennial ryegrass and wheat. *Plant and Soil* 97: 29-437.
- Jarvis SC & Jones LHP (1987) The absorption and transport of manganese by perennial ryegrass and white clover as affected by silicon. *Plant and Soil* 99: 231-240.
- Kato N & Owa N (1996) The factors affecting Si concentration in the soil solution: effects of soil solution pH Ca concentration, CO₂ gas and slag application. *Japanese Journal of Soil Science and Plant Nutrition* 67: 655-661.
- Kim JG & Han MS (1991) Effects of silicate phosphate fertilizer on silage maize grown on newly reclaimed red-yellow soils. 2. Weender fodder components, digestible dry matter and net energy yield.
- Kim WC, Chung W, Han DH & Chung KY (1977) Effects of lime on the increase in available silica content and rice growth. *Research Reports of the Office of Rural Development Soil Science, Fertilizer, Plant Protection and Micrology. Research Reports of the Rural Development Administration, Livestock* 33: 52-57.

- Korndorfer CM, Abdalla AL & Bueno da Silva IC (2001) Silicon and savanna grasses - a review. *Veterinaria Noticias* 7: 153-163
- Koski Vahala J, Hartikainen H & Tallberg P (2001) Phosphorus mobilization from various sediment pools in response to increased pH and silicate concentration. *Journal of Environmental Quality* 30: 546-552.
- Ledieu JS, Dautrebande A, Noifalise & Ben Harrath (1985) Modélisation del'évapotranspiration réelle de végétations herbacées. *Agric. Water Manag.* 10: 1-13.
- Leusch HJ & Buchenauer H (1989) Einfluss von Bodenbehandlungen mit siliziumreichen Kalken und Natriumtrisilikat auf den Befall des Weizens mit Erysiphe graminis und Septoria nodorum in Abhängigkeit von der Form der N-Dünger. *Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz* 96: 154-172.
- Liang-YongChao (1999) Effects of silicon on enzyme activity and sodium, potassium and calcium concentration in barley under salt stress. *Plant and Soil* 209: 217-224.
- Liang-YongChao, Shen-QiRong, Shen-ZhenGuo & Ma-TongSheng (1996) Effects of silicon on salinity tolerance of two barley cultivars. *Journal of Plant Nutrition* 19:173-183.
- Liang-YongChao Chen-Qin, Liu-Qian, Zhang-WenHua & Ding-RuiXing (2003) Exogenous silicon (Si) increases antioxidant enzyme activity and reduces lipid peroxidation in roots of salt-stressed barley (*Hordeum vulgare* L.). *Journal of Plant Physiology* 160: 1157-1164.
- LiYuan H & XiaoLiang L (1995) Content and distribution of available silicon in paddy soils in Hubei. *Journal of Huazhong Agricultural University* 14: 363-368.
- Lux A, Luxova M, Hattori T, Inanaga S & Sugimoto Y (2002) Silicification in sorghum (*Sorghum bicolor*) cultivars with different drought tolerance. *Physiologia Plantarum* 115: 87-92.
- Ma JF, Sasaki F & Matsumoto M (1997) Al-induced inhibition of root elongation in corn, *Zea mays* L. is overcome by Si addition. *Plant and Soil* 188: 171-76.
- Ma JF, Miyake Y & Takahashi E (2001) Silicon a beneficial element for crop plants. In: Datnoff LE, Snyder GH & Korndörfer GH (Eds). *Silicon in Agriculture. Studies in Plant Sciences* 8. Elsevier Science, Amsterdam, 17-39.
- Ma JF & Takahashi E (2002) Soil, fertilizer, and plant silicon research in Japan. Elsevier Amsterdam, 281.
- Mann R (2004) To identify, collate and asses research on the management and control of the main pestst and diseases on european golfcourses. Document No. 2112/1 St Ives Estate Bingley. UK. 80 pp.
- Marschner H (1995) Mineral nutrition of higher plants. Academic Press, London.
- Matichenkov VV & Ammosova YM (1996) Effect of amorphous silica on soil properties of a sod-podsolic soil. *Eurasian Soil Science* 28: 87.
- Matichenkov VV & Bocharnikova EA (2001) The relationship between silicon and soil physical properties. In: Datnoff LE, Snyder GH & Korndörfer GH (Eds). *Silicon in Agriculture. Studies in Plant Sciences* 8. Elsevier Science, Amsterdam, 209-219.
- Matichenkov VV, Calvert DV & Bocharnikova EA (2001) Effect of Si fertilization on growth and P nutrition of Bahiagrass. *Soil and Crop Science society of Florida. Proceedings, Volume 60*: 31-36.
- Matoh T, Kairusmee P & Takahashi E (1986) Salt-induced damage to rice plants and alleviation effect of silicate. *Soil Science and Plant Nutrition* 32: 295-304.
- Matsuura K, Fukunaga A & Sakanoue Y (1977) Model experiment on the redox potential of, and leaching of mineral nutrients from, individual layers of a waterlogged paddy soil. *Journal of the Science of Soil and Manure Japan* 48: 2, 25-34.
- Mattigod SV & Kittrick JA(1980) Temperature and water activity as variables in soil mineral activity

- diagrams. *Soil Science Society of America Journal* 44: 149-154.
- Mayland HF & Shewmaker GE (2001) Animal health problems caused by silicon and other mineral imbalances. *Journal of Range Management* 54: 441-446.
- McGeehan SL, Fendorf SE & Naylor DV (1998) Alteration of arsenic sorption in flooded-dried soils. *Soil Science Society of America Journal* 62: 828-833.
- Menzies JG, Ehret DL, Glass ADM & Samuels AL (1991a) The influence of silicon on cytological interactions between *Sphaerotheca fuliginea* and *Cucumis sativus*. *Physiological and Molecular Plant Pathology* 39: 403-414.
- Menzies JG, Ehret DL, Glass ADM, Helmer T, Koch C & Seywerd F (1991b) Effects of soluble silicon on the parasitic fitness of *Sphaerotheca fuliginea* on *Cucumis sativus*. *Phytopathology* 81: 84-88.
- Merah O, Deleens E & Monneveux (1999) Grain yield, carbon isotope discrimination, mineral and silicon content in durum wheat under different precipitation regimes. *Physiologia Plantarum* 107: 387-394.
- Meyer JH & Keeping MG (2001) Past, present and future research of the role of silicon for sugarcane in southern Africa. In: Datnoff LE, Snyder GH & Korndörfer GH (Eds). *Silicon in Agriculture. Studies in Plant Sciences* 8. Elsevier Science, Amsterdam, 257-275.
- Moore D (1984) The role of silica in protecting Italian ryegrass (*Lolium multiflorum*) from attack by dipterous stem-boring larvae (*Oscinella frit* and other related species) *Ann. Appl. Biol.* 104: 161-166.
- Myhr K & Erstad KJ (1996) Converter slag as a liming material on organic soils. *Norwegian Journal of Agricultural Sciences* 10: 83-93.
- Nanayakkara UN, Uddin W & Datnoff LE (2005) Effects of silicon on development of gray leaf spot in perennial ryegrass turf. *Plant Pathology Dept., Penn State University, University Park, PA 16802*; (2) *Plant Pathology Dept., University of Florida-IFAS, Gainesville, FL 32611*. Publication no. P-2005-0029-NEA.
- Nicholson RL & Hammerschmidt R (1992) Phenolic compounds and their role in disease resistance. *Annual Review of Phytopathology* 30: 369-389
- Nieuwenhuis P & Lales JS (2001) Response of maize (*Zea mays* L.) to various modes and levels of silicon application. *Philippine Agricultural Scientist* 84: 397-400.
- Nishita H, Haug RM & Alexander GV (1973) Influence of organic matter on the availability of certain elements to barley seedlings grown by a modified Neubauer method. *Plant and Soil* 39: 161-176
- North Carolina State (1997) Effect of soluble silica on brown patch and dollar spot of creeping bentgrass. *No. Carolina Turfgrass*, Aug./Sept., 34-36.
- Novozamsky I, Van Eck R & Houba VJG (1984) A rapid determination of silicon in plant material. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 15: 205-211.
- Obermueller AJ & Mikkelsen DS (1974) Effects of water management and soil aggregation on the growth and nutrient uptake of rice. *Agronomy Journal* 66: 627-632.
- O'Reilly SE & Sims JT (1995) Phosphorus adsorption and desorption in sandy soil amended with high rates of coal fly ash. *Communications in soil science and plant analysis*. 26: 2983.
- Owino-Gerroh C & Gascho GJ (2004) Effect of silicon on low pH soil phosphorus sorption and on uptake and growth of maize. *Communications in soil science and plant analysis*. Vol 35: 2369-2378.
- Pandey AK & Yadav RS (1999) Effect of antitranspirants on phenological traits and yield of wheat under water deficit conditions. *Indian Journal of Agricultural Research* 33: 159-164.
- Raid RL, Anderson DL & Ulloa MF (1992) Influence of cultivar and amendment of soil with calcium silicate slag on foliar disease development and yield of sugar-cane. *Crop Protection* 11: 84-88
- Rao GG (2000) Studies on salt tolerance in rice (*Oryza sativa* L.): role of silicon. *Journal of Plant Biology* 27: 57-60.
- Raven JA (2001) Silicon transport at the cell and tissue level. In: Datnoff LE, Snyder GH & Korndörfer

- GH (Eds). Silicon in Agriculture. Studies in Plant Sciences 8. Elsevier Science, Amsterdam, 41-55.
- Ren Jun, Guo Jinrui, Xing XiuQin, Qi-Guang & Yuan-ZhenLin (2002) Preliminary study on yield increase effects and yield increase mechanism of silicate fertilizer on maize. *Journal of Maize Sciences* 10: 86.
- Rex M (2000) Auswirkungen langjähriger Anwendung von silikatischen Düngekalken auf Parameter der Bodenfruchtbarkeit. *Nachhaltige Landwirtschaft, VDLUFA Kongressband 2000*, Stuttgart, 211-210.
- Rodgers-Gray BS & Shaw MW (2004) Effects of straw and silicon soil amendments on dome foliar and stem-base diseases in pot-grown winter wheat. *Plant Pathology* 53: 733-740.
- Rodrigues FA, McNally DJ, Datnoff LE, Jones JB, Labbe C, Benhamou N, Menzies JG & Belanger RR (2004) Silicon enhances the accumulation of diterpenoid phytoalexins in rice: a potential mechanism for blast resistance. *Phytopathology* 94: 177-183.
- Rondeau E (2001) Effect of potassium silicates on disease tolerance of bentgrass. *Seminaire de fin d'études, Centre de Recherche en Horticulture, Université Laval, Québec, Canada*.
- Saigusa M, Onozawa K, Watanabe H & Shibuya K (2000) Effects of porous hydrate calcium silicate on the wear resistance, insect resistance, and disease tolerance of turf grass "Miyako". *Grassland Sci.* 45: 416-420.
- Samuels AL Glass ADM Ehret DL & Menzies JG (1991b) Distribution of silicon in cucumber leaves during infection by powdery mildew fungus (*Sphaerotheca fuliginea*). *Plant Physiology* 99: 1509-1514.
- Sangster AG, Hodson MJ & Tubb HJ (2001) Silicon deposition in higher plants. . In: Datnoff LE Snyder GH & Korndörfer GH (Eds). *Silicon in Agriculture. Studies in Plant Sciences* 8. Elsevier Science, Amsterdam, 85-114.
- Schmidt RE, Zhang X & Chalmers DR (1999) Response of photosynthesis and superoxide dismutase to silica applied to creeping bentgrass grown under two fertility levels. *Journal of Plant Nutrition* 2: 1763-1773.
- Schnug E & Von Franck E (1985) Untersuchungen zur Silizium-Versorgung von Kulturpflanzen in Schleswig-Holstein. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde*, 148: 1-9.
- Schultz JE & French RJ (1976) Silicon uptake by wheat and its relation to grain yield and water use. *Australian Journal of Experimental Agriculture and Animal Husbandry* 16(78) 123-128.
- Schwandes LP, Snyder GH & Wilkerson J (2001) Plant-available silicon in selected Alfisols and Ultisols of Florida. *Proceedings Soil and Crop Science Society of Florida*, 60: 57-59.
- Seo S & Lee JK (1991) Effect of silicate application during summer season on grass growth, yield and nutritive value in pasture. *Korean Journal of Animal Sciences*, 33: 106-110.
- Shewmaker GE, Mayland HF, Rosenau RC & Asay KH (1989) Silicon in C3-grasses: effects on forage quality and sheep preference. *Journal of Range Management* 42: 122-127.
- Shimojo M & Goto I (1985) Effect of soluble silica on digestion of forage with rumen fluid of goat and cellulase. *Japanese J Zootechnical Science* 56: 20-24.
- Singh KP & Sarkar MC (1992) Phosphorus availability in soils as affected by fertilizer phosphorus, sodium silicate and farmyard manure. *Journal of the Indian Society of Soil Science* 40: 762-767.
- Smid HG, Grashoff C & Aarts HFM (1998) Vochtverbruik en droogtegevoeligheid van voedergewassen. *Experimenteel onderzoek 1994-1996. AB-DLO. Rapport 91. Wageningen*.
- Smith GS & Nelson AB (1975) Effects of sodium silicate added to rumen cultures on forage digestion, with interactions of glucose, urea and minerals. *J. Anim. Sci* 41: 891-899.
- Smith GS, Nelson AB & Boggino EJA (1971) Digestibility of forages in vitro as affected by content of silica. *J Anim Sci* 33: 466-471.
- Snyder GH (2001) Methods for silicon analysis in plants, soils and fertilizers. In: Datnoff LE, Snyder GH

- & Korndörfer GH (Eds). Silicon in Agriculture. Studies in Plant Sciences 8. Elsevier Science, Amsterdam, 185-196.
- Subramanian S & Gopalswamy A (1991) Effect of moisture, organic matter, phosphate and silicate on availability of silicon and phosphorus in rice soils. *Journal of the Indian Society of Soil Science*, 39: 99-103.
- Thiagalasingam K, Silva JA & Fox RL (1977) Effect of calcium silicate on yield and nutrient uptake in plants grown on a humic ferruginous latosol. *Proceedings Conference on Chemistry and Fertility of Tropical Soils*, Nov 1973, Kuala Lumpur, Malaysia, 149-155.
- Trivedi HB, Rao TVR, Bagdi DL & Rao GG (2004). Influence of silicon on growth and salt uptake in wheat under salinity. *Indian Journal of Plant Physiology* 9: 360-366.
- Truscott DR & Currie PO (1989) Cattle preferences for a hybrid grass: Chemical and morphological relationship. *Journal of Range Management* 42: 22-27.
- Tuisiri B & Blue WG (1984) Effects of lime, phosphorus, calcium silicate and rice hulls on availability of phosphorus to corn on an Ultisol. *Soil and Crop Science Society of Florida Proceedings*, 43: 14-21.
- Underwood EJ & Suttle NF (1999) *The mineral nutrition of livestock* Wallingford, UK: CABI Publishing. 614 pp.
- Uriarte RF, Shew HD & Bowman DC (2004) Effect of soluble silica on brown patch and dollar spot of creeping bentgrass. *J Plant Nutri* 27: 325-339.
- Yeo AR, Flowers SA, Rap G, Welfare K, Senanayake N & Flowers TJ (1999) Silicon reduces sodium uptake in rice (*Oryza sativa* L.) in saline conditions and this is accounted for by a reduction in the transpirational bypass flow. *Plant, cell and environment* 22: 559-565.
- Van der Schans D, Stienezen M, Everts H & Sniijders P (1998) Opbrengstvariabiliteit van voedergrassen op droogtegevoelige grond. Verslag van veldproeven te Gastel en Leende in 1994, 1995 en 1996. *Praktijkonderzoek Rundvee, Schapen en Paarden. Intern rapport 343*, 94 pp.
- Vandenbosch T, Philipsen B, Janssen S, Huybrechts M, Wera G, Van den Pol-van Dasselaar A, Alblas J & Grashoff K (2000) Droogtetolerantie van landbouwgewassen in het Benelux Middengebied. *Watermanagement Benelux Middengebied, Literatuurstudie*, 107 pp.
- Van Soest PJ & Jones LHP (1968) Effect of silica in forages upon digestibility. *J. Dairy Sci* 51: 1644-1648.
- Zhang HL (1987) Preliminary study on the content of available SiO₂ in soil. *Soils* 19, 123-126.
- Zhou-Qing, Pan-GuoQing, Shi-ZouJia, Meng-YinTang & Xie-YiCheng (2002) Effects of Si fertilizer application on maize (*Zea mays*) yield and on quality of maize population. *Journal of Maize Sciences* 10: 81-83.