

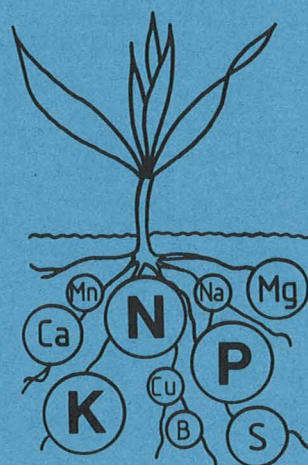


**SVERIGES
LANTBRUKSUNIVERSITET**

**KISEL I MARK-VÄXT-SYSTEMET
MED SÄRSKILD HÄNSYN TILL
SLAGGSILIKATER
EN LITTERATURGENOMGÅNG**

**SILICON IN THE SOIL-PLANT-SYSTEM
WITH SPECIAL REFERENCE TO SLAG
SILICATES
A LITERATURE REVIEW**

HOLGER KIRCHMANN



**Institutionen för markvetenskap
Avd. för växtnäringslära**

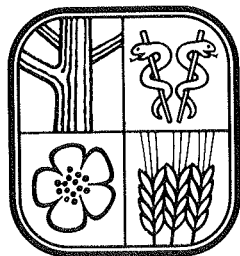
**Swedish University of Agricultural Sciences
Dept. of Soil Sciences
Division of Soil Fertility**

**Rapport 168
Report**

Uppsala 1986

ISSN 0348-3541

ISBN 91-576-2857-2

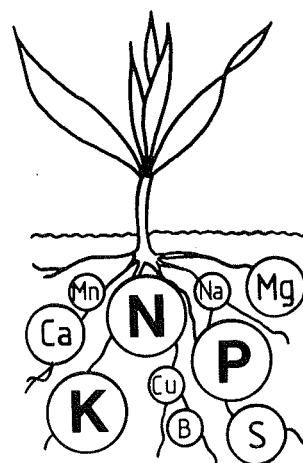


**SVERIGES
LANTBRUKSUNIVERSITET**

**KISEL I MARK-VÄXT-SYSTEMET
MED SÄRSKILD HÄNSYN TILL
SLAGGSILIKATER
EN LITTERATURGENOMGÅNG**

**SILICON IN THE SOIL-PLANT-SYSTEM
WITH SPECIAL REFERENCE TO SLAG
SILICATES
A LITERATURE REVIEW**

HOLGER KIRCHMANN



**Institutionen för markvetenskap
Avd. för växtnäringslära**

**Swedish University of Agricultural Sciences
Dept. of Soil Sciences
Division of Soil Fertility**

**Rapport 168
Report**

Uppsala 1986

ISSN 0348-3541

ISBN 91-576-2857-2

KISEL I MARK-VÄXT-SYSTEMET
MED SÄRSKILD HÄNSYN TILL SLAGGSILIKATER
EN LITTERATURGENOMGÅNG

SILICON IN THE SOIL-PLANT-SYSTEM
WITH SPECIAL REFERENCE TO SLAG SILICATES
A LITERATURE REVIEW

Holger Kirchmann
Institution för markvetenskap
Avdelning för växtnäringslära

SAMMANFATTNING

- Vid kalkning med 4 ton slagg per hektar tillförs marken flera hundra kilogramm kisel i form av lösliga silikater. Kiseltillförseln ökar mängden löst kiselsyra i markvätskan.
- Ökningen av kiselsyrakoncentrationen i marklösningen är orsaken till flera följdverkningar:
En fosformobilisering i jordar med pH-värden större än 6,0 kan fastställas.
En kortvarig strukturförbättring och porstorleksförändring har observerats i några experiment dock ej generellt.
En högre kiselhalt i monokotyledona grödor har konstaterats.
- En högre kiselkoncentration i växten utgör både ett ökad skydd mot patogener och en förstärkning av stabiliteten hos växtvävnader. Vidare finns indikationer på en förbättrad ljusabsorption och en inverkan på transpirationen vid ökande kiselhalter.
- Detta spektrum av möjliga kiseleffekter gör det svårt att avgöra varför en skördeökning har skett i ett försök efter kiseltillförsel. Fosformobiliseringen kan vara en orsak. Lägre skördeförlust genom bättre patogenförsvar en annan.
- En noggrann analys av de olika kiseleffekterna är en förutsättning för att kunna förstå skördeutfallet av kiselgödslade grödor.

SUMMARY

- Through liming with 4 tons of slag per hectare several hundred kilograms of soluble silicates are added to the soil. This silicate addition leads to an increase of the monosilicic acid concentration in the soil solution.
- The increase of monosilicic acid in the soil solution may cause several primary effects:
Phosphate mobilisation in soils with pH values higher than 6.0, short term beneficial effects on soil structure and pore size distribution and higher silicon contents in monocotyledonous crops.
- These primary effects may be accomplished by secondary causes:
Increased phosphate uptake, enhanced resistance against fungus disease and noxious insects, improved light absorption to chlorophyll tissues, decreased transpiration rate and a higher stability of plant tissues.
- This spectrum of possible silicon effects on soil and plant shows, that a possible yield increase after silicon fertilisation can only be explained by analysing the present situation.

INNEHÅLL

I.	INLEDNING	4
II.	SAMMANSÄTTNING OCH EGENSKAPER AV SLAGGER	5
	Masungsslagg	5
	Konverterslagg	5
III.	VERKAN AV ANVÄNDNING AV LÖSLIGA SILIKATER (SLAGGER)	
	I MARKEN	8
	1. Ökning av silikatkoncentration i markvätskan	8
	2. Fosformobilisering	10
	Principer för anjonadsorption	11
	Anjonadsorption vid olika pH-värden	12
	Anjonkonkurrens	14
	Slutsatser	16
	3. Förändring av markstruktur och porstorlek	16
IV.	KISEL I GRÖDAN	16
	1. Upptagning i grödan	16
	2. Utfällning i plantor	19
	3. Funktioner i plantan	19
	Stabilisering av växtvävnad	19
	Försvar mot patogener	21
	Inverkan på transpiration	23
	'Fönstereffekt'	23
	4. Inflytande av kisel syra på upptagning av andra näringsämnen	23
V.	REFERENSER	25

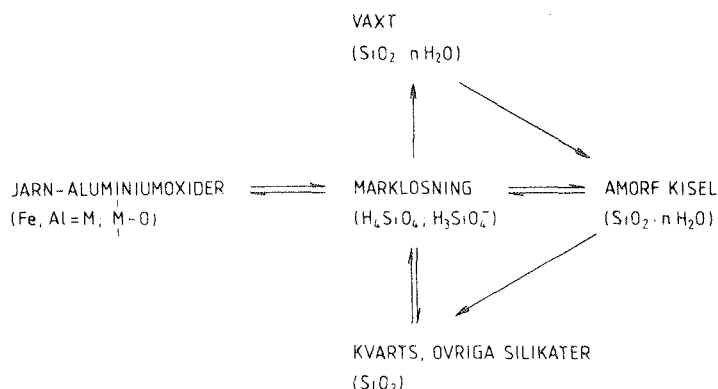
I. INLEDNING

Kisel tas upp av växterna i form av kiseltsyra (H_4SiO_4) och lagras som amorf kisel ($\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$) i växthår och epidermis-celler av blad, strån och rötter (Kaufman et al., 1981). Mängderna som inlagras hos monokotyledoner är 10-20 gånger större än för dikotyledoner (Jones och Handreck, 1967; Fidanovski, 1968).

De genomsnittliga kiselhalterna i gräs och spannmål varierar mellan 0,15 och 1,20 procent Si i torrsubstansen och är därmed i samma nivå som makronäringsämnen (Fidanovski, 1968). Halterna är högst i boss och agnar (uppemot 7,5 % i ts) därnäst i blad och strån (ca 0,75 % i ts) och lägst i frön (ca 0,015 % i ts) (Fidanovski, 1968; Stählin och Tirtapradja, 1971). Mängden som tas upp av en spannmålsgröda per hektar och år kan vara i storleksordningen 50 kg Si eller mera.

Kisel har påvisats vara ett essentiellt näringsämne för åkerfräken (*Equisetum arvense* L.), (Chen och Lewin, 1969), dock inte för någon gröda som odlas i jordbruk. För ris, sockerrör, solrosor och sockerbeter har en främjande effekt konstaterats (Lewin och Reiman, 1969).

I samband med användning av slagger från järn- och stålindustrin som kalkningsmedel i jordbruket kan marken tillföras flera hundra kilogram kisel per hektar. Kisel är ett ämne, som diskuteras i samband med grödans fosforupptagning och patogenskydd. I det följande skall kiselns verkan på mark och gröda belysas med hjälp av litteraturuppgifter. I figur 1 visas kiselns dynamik i mark-växt-systemet.



Figur 1. Schematisk framställning av kiselns dynamik i mark-växt-systemet.

Figure 1. Schematic diagram on the silicon dynamic in the soil-plant-system.

II. SAMMANSÄTTNING OCH EGENSKAPER AV SLAGGER

Olika slaggtyper kan användas som kalkningsmedel inom jordbruket. De viktigaste slaggtyperna är:

masugnsslagg

konverterslagg (konverterkalk)

thomasslagg (thomasfosfat, thomaskalk)

I svensk jordbruk används idag enbart konverterslagger från stålindustrin. Produktionen av thomasslagg har upphört i Sverige. Masugnsslagg bearbetas till vägmateriäl eller används som råvara för mineralull och cementframställning.

Masugnsslagg

Masugnsslagg är en biprodukt från råjärnframställningen. När järnmalm, koks, kalksten eller dolomit upphettas till cirka 1500 grader, reduceras järnoxid till järn.

Andra komponenter i malmen såsom silikater, aluminium, fosfor och olika metaller bildar tillsammans med kalkstenens kalcium- och magnesiuminnehåll en slag. Den luftkylda slagvaran är en homogen kristallin produkt medan vattenkyld slag är amorf och består av porösa granuler.

Konverterslagg

Konverterslagg är en biprodukt från framställningen av stål ur råjärn. Smält råjärn, kalksten eller dolomit överförs till en konverterugn och syrgas blåses mot smältbadet (Linz-Donawitz-processen). Föroreningar i råjärnet såsom kol, silikater, mangan och fosfor upplöses och blir oxiderade. Ämnena binds till kalcium och magnesium som tillsammans bildar konverterslaggen. Slaggens struktur är, liksom för masugnsslaggen, beroende av kylningsprocessen efter tappningen.

Den kemiska sammansättningen av masugns- och konverterslagg visas i tabell 1.

De aktuella uppgifterna överensstämmer med äldre analysvärden på olika svenska masugnsslagger, publicerade av Torstensson och Alvelid (1952). I båda slaggtyperna är kalcium kvantitativt det viktigaste grundämnet. Kiselhalten är 7,5 procent i konverterslagg och 16,3 procent i masugnsslagg.

Den höga järnhalten i konverterslagg (15%) härstammar från dekanteringsprocessen. När den flytande slaggen skiljs från stålmassan, dekanteras det översta stålskiktet tillsammans med slaggen för att undvika eventuella föroreningar i stålmaterialiet. Järnet i konverterslaggen föreligger därmed huvudsakligen i sin elementära form.

Både masugnsslaggens halt av magnesium (6,6%) och mangan (4,0%) samt konverterslaggens fosforhalt (0,4%) är av intresse ur gödslingsynpunkt.

Den huvudsakliga skillnaden mellan dagens konverterslagg och tidigare producerad thomasslagg ligger i deras fosforhalt. Thomasslagg innehöll cirka 4 procent fosfor medan konverterslaggen innehåller en tiondel av detta. I den nuvarande produktionsprocessen avskiljs naturligt förekommande apatiter från järnmalm före smältningsprocessen.

Slaggens fosfor är mycket svårlös i vatten men löser sig

Tabell 1. Grundämnesanalys av slagger och karakteristika
Table 1. Elemental composition and basic data of slags

Slaggtyp [#]	Ca %	Mg %	Si %	Al %	K %	Na %	P %	S %	B %	pH (H ₂ O)	CaO- ekv%
Masugns- slag Blast furnace slag	28	6,6	16	2,5	0,4	0,2	,02	1,4	,005	8	50
Konverter- slag Converter slag	36	1,2	7,5	1,0	,02	,02	0,4	0,2	,013	10	50

Slaggtyp [#]	Fe %	Mn %	Ti %	V %	Cr ppm	Mo	Co	As	Zn	Pb	Cd	Hg	Cu
Masugns- slag Blast Furnace slag	,31	,85	,54	,04	13	50	50	1	10	10	0,1	10	5
Konv.- slag Converter slag	15	4	0,2	1,2	400	50	10	10	10	10	1	-	50

uppgifter från Svenskt Stål AB,
Merox, Oxelösund.

i citronsyra. Citronsyralösligheten hos slaggens fosfater varierar mellan 85 och 96 procent (Brown, 1967; Munk, 1971). Lösligheten mäts i en 2-procentig lösning.

Titan föreligger i koncentrationer om 0,54 och 0,2 procent i form av rutil (TiO₂) i masugns- respektive konverterslagg. Rutil är en mycket stabil förening och resistent mot vittring i marken vid pH-värden högre än 3. Anrikning av titan i växter genom slagganvändning kan därför uteslutas.

Halterna av mikronäringsämnen såsom bor, molybden, koppar och zink är låga likasom halterna av andra tungmetaller utom för mangan. Slagger från specialståltillverkningen kan däremot uppvisa höga koncentrationer av vissa metaller, t.ex. krom, och kan därför ej användas utan restriktioner i jordbruket.

Utöver grundämnessammansättningen är kännedom om de olika kemiska föreningarna i vilka grundämnena föreligger av stort intresse. En förståelse för slaggernas reaktioner i marken kan då bli möjlig. I tabell 2 anges de olika föreningar som har identifierats i slagger.

Tabell 2. Identifierade kristaller och kemiska föreningar i slaggar (Brown, 1967; Grauhe och Oberlies, 1970; Munk, 1971, 1976)

Table 2. Identified crystals and compounds in slags (Brown, 1967; Grauhe and Oberlies, 1970; Munk, 1971, 1976)

Förening Compound	Kemisk formel Formular
Melilit	åkermanit $\text{MgO} \times 2 \text{CaO} \times 2 \text{SiO}_2$; $\text{Ca}_2\text{Mg}[\text{Si}_2\text{O}_7]$
	gehlenit $2 \text{CaO} \times \text{Al}_2\text{O}_3 \times 2 \text{SiO}_2$; $\text{Ca}_2\text{Al}[(\text{Si}, \text{Al})_2\text{O}_7]$
Kalciumsilikat	CaSiO_3
Monticellit	CaMgSiO_4
Dikalcium-silikat	Ca_2SiO_4
Kalciumferriter	$\text{CaO} \times \text{Fe}_2\text{O}_3$; $\text{CaO} \times \text{Fe}_2\text{O}_3 \times \text{FeO}$
Kalciumsiliko-fosfater	$\text{CaO} \times \text{P}_2\text{O}_5 \times \text{SiO}_2$
Tetrakalcium-fosfat	$4 \text{CaO} \times \text{P}_2\text{O}_3$
Kalciumoxid	CaO
Kalciumhydroxid	$\text{Ca}(\text{OH})_2$
Metalliskt järn	Fe

Melilit är den dominerande kristalltypen i alla slaggtyper varierande mellan 53 och 87 procent (Grauhe och Oberlies, 1970; Munk, 1986). Olika kalciumsilikater, fri kalciumoxid och kalciumhydroxid, kalciumferriter, kalciumsilikofosfater och små mängder av kvarts har analyserats (Körber och Trömel, 1933; Kappen, 1950; Eitel, 1954; Tröbel och Zaminer, 1959; Grauhe och Oberlies, 1970; Munk, 1971).

I konverterslaggar (Linz-Donawitz-processen) har en kalcium-silikatbeläggning kring olösta kalkstenspartikler observerats (Brown, 1967). Vid en jämförelse av olika slaggtyper visade det sig att det är samma kemiska föreningar som förekommer men att de procentuella halterna varierar kraftigt (Brown, 1967).

III. VERKAN AV ANVÄNDNING AV LÖSLIGA SILIKATER (SLAGGER) I MARKEN

1. Ökning av silikatkoncentrationen i markvätskan

Av tabell 2 framgår att slagger består av ett flertal komplicerade oorganiska föreningar. Ett studium av slaggens reaktioner i marken är på grund av denna komplexitet en svår uppgift. Detta gäller också om bara ett av många grundämnen skall undersökas eftersom det kan föreligga i många olika former. Om man utvärderar och bearbetar resultat av experiment där ett komplext sammansatt stoff har undersökts, måste man vara uppmärksam på att de funna resultaten är en nettoeffekt av alla de olika ämnenas bruttoreaktioner. När man t.ex. kan mäta en högre kiselsyrakoncentration i markvätskan efter slaggtillförsel, så visar detta att slaggens silikater är mer lösliga än markens men inte vilka slaggbeståndsdelar det rör sig om.

För att fastställa lösligheten av de olika ämnena så måste varje enskilt ämne speciellt studeras i just detta avseende. Lösligheten av två av de i slagger förekommande silikaterna är kända. Det är kalciumsilikat och dikalciumsilikat. Deras kemiska reaktioner och jämviktskonstanter kan jämföras med de i marken förekommande silikaterna. I tabell 3 visas lösligheten av både markens mest svårlösliga silikat (kvarts) och av mer lösliga kiselföreningar samt av två slaggsilikater.

Ur tabell 3 framgår, att

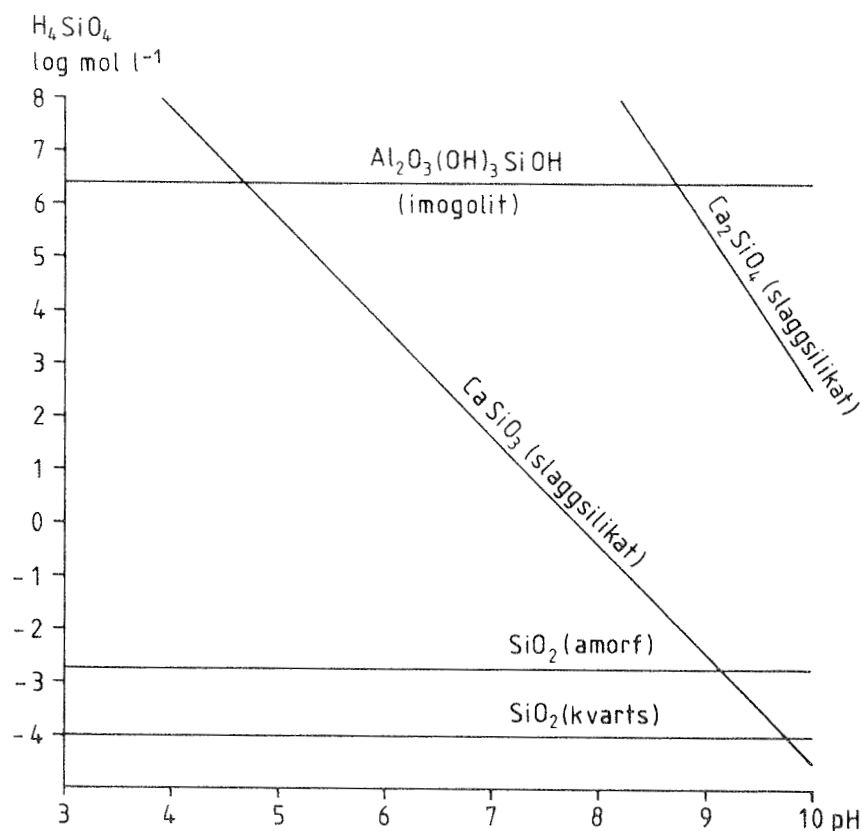
- alla silikater föreligger som kiselsyra (H_4SiO_4) när de är lösta i markvätskan
- lösligheten av bägge slaggsilikaterna är kopplad till vätejonkoncentrationen, dvs den är pH-beroende.

För att demonstrera lösligheten av de nämnda komponenterna vid olika pH-värden har ett löslighetsdiagram konstruerats som visas i figur 2.

Tabell 3. Reaktioner och jämviktskonstanter för några mark- och slaggsilikater (från Lindsay, 1979)

Table 3. Chemical reactions and equilibrium constants of some soil and slag silicates (from Lindsay, 1979)

Förening Compound	Reaktionsformler Reactions	Diss. log K
Kvarts	$\text{SiO}_2 + 2 \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{H}_4\text{SiO}_4$	-4,00
Amorf kisel	$\text{SiO}_2 + 2 \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{H}_4\text{SiO}_4$	-2,74
Imogolit	$\text{Al}_2\text{O}_3(\text{OH})_3\text{SiOH} + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons 2 \text{AlOOH} + \text{H}_4\text{SiO}_4$	6,4
Kalciumsilikat	$\text{CaSiO}_3 + 2 \text{H}^+ \rightleftharpoons \text{Ca}^{2+} + \text{H}_4\text{SiO}_4$	13,27
Dikalciumsilikat	$\text{Ca}_2\text{SiO}_4 + 4 \text{H}^+ \rightleftharpoons 2 \text{Ca}^{2+} + \text{H}_4\text{SiO}_4$	60,3



Figur 2. Två slaggs- och marksilikaters löslighet vid olika pH-värden.

Figure 2. Solubility of two slag and soil silicates at different pH values.

För kvarts, amorf kisel och imogolit är de lösta kiselsyrahalterna oberoende av pH-värden och resulterar därför i vågräta linjer. Lösligheten av de två slaggsilikaterna ökar vid lägre pH-värden. Även vid så höga pH-värden som omkring 9 är deras löslighet större än den amorf kiselns. Diagrammet visar att dessa slaggsilikater har en högre löslighet än kvarts och amorf kisel vid pH-värden mellan 3 och 9, dvs inom markens naturliga syra-basintervall.

Mätningar av kiselsyrakoncentrationer i marklösningen efter tillsats av masugns- och konverterslagger visade att kiselsyrahalterna hade ökat (Munk, 1981). Ökningen i de undersökta jordarna, uttryckt som mängd löst kisel, varierade från 2,8 till 5,0 respektive 5,0 till 6,9 mg Si per liter marklösning. Dessa värden ligger inom löslighetsintervallet för kvarts och amorf kisel och är mycket lägre än vad som visas i figur 1. Av litteraturen framgår att kiselsyrahalter i marklösningen varierar inom intervallet 1,4 - 56,0 mg Si per liter marklösning. Referenser och angivna halter redovisas i tabell 4. Det bestickande med dessa uppgifter är att alla värden ligger mycket nära eller inom löslighetsintervallet för kvarts och amorf kisel.

Tabell 4. Litteraturuppgifter om kiselsyrahalter i marklösning
 Table 4. Literature data on monosilicic acid contents in soil solution

År Year	Referens Reference	H_4SiO_4 mol l^{-1}	= Si mg l^{-1}
1953	Birch	$10^{-4,3} - 10^{-3,07}$	1,4 - 23,3
1963	Jones och Handreck	$10^{-3,00} - 10^{-3,07}$	30,0 - 56,0
1967	Schachtschabel och Heinemann	$10^{-4,1} - 10^{-3,39}$	2,1 - 11,2
1967	Miller	$10^{-3,74} - 10^{-3,43}$	5,1 - 10,3
1972	Elgawhary och Lindsay	$10^{-3,25} - 10^{-2,74}$	20,0 - 51,0
1980	Sadiq et al.	$10^{-3,5} - 10^{-2,72}$	8,6 - 53,3

Undersökningar av Elgawhary och Lindsay (1972) visade att tillsats av stora mängder lösliga silikater till marken inte höja kiselsyrahalten till mer än 51 mg Si per liter marklösning. Senast efter 2 dagar hade koncentrationen sjunkit till detta översta gränsvärde. Författarna drar slutsatsen att fasta partiklar som är mer lösliga än kvarts och mindre lösliga än amorf kisel bestämmer kiselsyrahalten i marklösningen. Avvikelse från detta koncentrationsintervall återställs mycket snabbt till ett jämviktsläge. Därav följer att slaggsilikater enbart kan öka kiselsyrakoncentrationen i marklösningen inom det nämnda intervallet. Mätningar gjorda av Munk (1981) bekräftar detta.

2. Fosformobilisering

Frågan om lättlösliga silikater påverkar fosforadsorptionen i marken har diskuterats sedan början av 1900-talet. Många intressanta odlingsförsök har utförts för att belysa denna problemställning. I ett flertal publicerade undersökningar har en ökad fosformobilisering kunnat mätas genom högre skörd eller större fosforupptag i grödan efter tillsats av lättlösliga silikater eller slaggar jämfört med tillsats av kalkstensmjöl (Schollenberger, 1922; Lemmerman et al., 1925; Jessen och Lesch, 1930; Achromeiko, 1934; Toth, 1939; Ganssmann, 1962; Ayres, 1965; Hunter, 1965; Roy et al., 1971; Russell, 1973; Uhlen, 1974; Wildhagen, 1975; Scheffer, 1977). I undersökningar av Laws (1950), Cooke (1965), Jokinen (1982) och Schnug och Franck (1985) har sådan verkan däremot inte kunnat fastställas. Antalet publikationer i vilka en fosformobilisering har påvisats överväger, men faktum kvarstår att denna reaktion inte generellt har kunnat mätas.

Grundläggande markkemiska undersökningar har visat att fosformobilisering genom silikater sker genom en anjonutbytesreaktion (Toth, 1937, 1938; Beckwith och Reeve, 1963; Scheffer et al.,

1980,1982). Utbytesreaktionen är beroende av silikat- och fosfatjonkoncentrationen. Efter fosfattillsats har i stället en silikatmobilisering kunna mätas, dvs den omvända reaktionen (Reifenberg och Buckworld, 1954; Beckwith och Reeve, 1963). Anjonutbyte på markkolloiderna är en komplex reaktion. Flera olika delprocesser ingår som är beroende av markens och jonernas egenskaper. En mycket kort och sammanfattande teoretisk beskrivning av anjonutbytet ges nedan.

Principer för anjonadsorption

Adsorptionen av anjoner bestäms av anjonernas och markpartiklarnas egenskaper. Markpartiklar uppvisar negativa laddningsförhållanden på ytan som ett nettoresultat av både positiva och fler negativa laddningar. Laddningsställena av bägge slagen samexisterar men negativa överväger. Denna negativa nettoladdning på markpartiklarna är inte konstant utan ändras sig med pH-värdet. Ju högre pH-värdet är desto fler negativa och desto färre positiva laddningar finns det. Markens katjonutbyteskapacitet ökar med stigande pH-värden och anjonutbyteskapaciteten avtar. Mellan pH 4 och 7 finns det dock alltid en mindre andel positiva laddningar på markpartiklarna (Wiklander, 1976).

Man skulle kunna förmoda att anjonadsorptionen fungerar likadant på de positivt laddade partikelplatserna som för katjonerna på de negativt laddade platserna. Detta är dock bara fallet för klorid(Cl^-), nitrat(NO_3^-) och perklorat(ClO_4^-). Dessa anjoner adsorberas icke specifikt genom elektrostatiska krafter till de positiva laddningarna. Denna typ av anjonadsorption är fysikalisk och ingen elektrontransport mellan anjon och markpartikel sker.

Andra anjoner såsom silikat(H_3SiO_4^-), fosfat(H_2PO_4^- , HPO_4^{2-}), borat(H_4BO_4^-), selenit(SeO_3^{2-}), karbonat(HCO_3^- , CO_3^{2-}) och organiska syror blir däremot specifikt adsorberade. Attraktionen av dessa anjoner till markpartiklar är mycket större än för de andra anjonerna och de ingår en kemisk bindning med markpartikelns molekyler. Specifik anjonadsorption betyder att anjonerna blir kovalent bundna genom en kemisk bindning och inte genom elektrostatiska, fysikaliska krafter. Anjoner som är specifikt adsorberade är därför mycket hårdare bundna än icke specifika anjoner. Detta faktum är också välkänt från gödslingen med fosfor. En mycket stor del av fosfor blir adsorberad till järn- och aluminiumoxider och kan inte tas upp av växten. Ett exempel på specifik adsorption mellan silikatjon och markpartikel visas nedan:



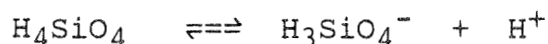
Det sker ett utbyte av molekyler (H_2O mot H_3SiO_4^-) vid metallkatjonen (Fe,Al) och inte bara en elektrostatisk attraktion. Det föreligger en kovalent kemisk bindning mellan kiselsyra och markpartiklar. Fosfatjoner kan ingå samma typ av kemisk bindning på markpartikelytor som silikatjoner.

Anjonadsorption vid olika pH-värden

Anjonadsorption vid olika pH-värden i marken (3 - 12,5) har undersökts av Hingston et al. (1967,1972). Lika stora mängder kisel- och fosforsyra av samma koncentration tillsattes till goetit ($\text{FeO} \cdot \text{OH}$, en typ av järnoxid) och gibbsit ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3 \text{H}_2\text{O}$, en typ av aluminiumoxid), som är två av markens viktiga mineraler med positivt laddade ytor. De adsorberade anjonmängderna vid olika pH-värden visas i figur 3.

Kurvan för silikat visar ett maximum vid pH 9,6; kurvan för fosfat ändrar lutningen vid pH-värden av 7,2 och 12,3. Den streckade kurvan indikerar kiselsyrans dissociation.

Kiselsyra dissocierar till silikatjoner:



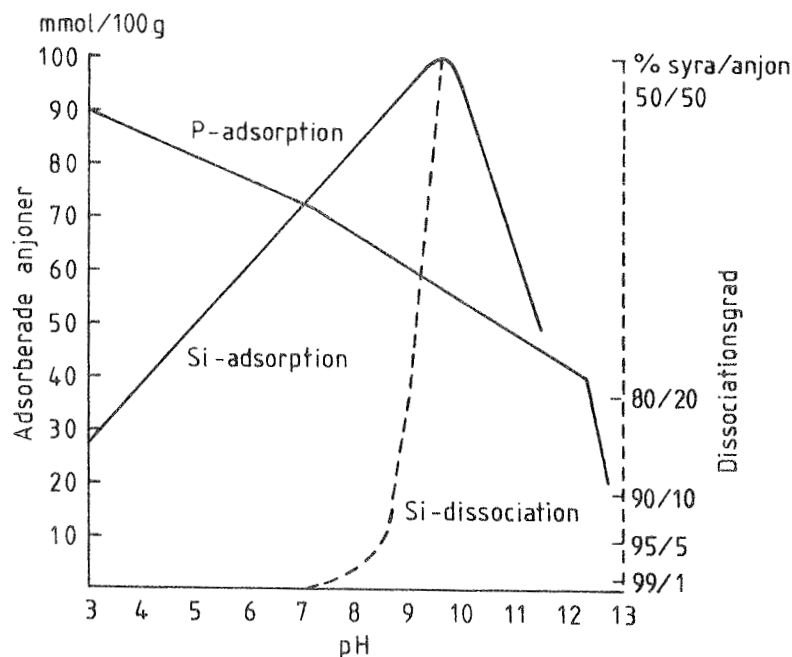
Dissociationskonstanten (pK-värdet) för denna reaktion är 9,77.

Adsorptionsmaximum i figur 3 ligger mycket nära pK-värdet.

Fosforsyra dissocierar till fosfatjoner:



med dissociationsvärden för $\text{pK}_1 = 2,15$; $\text{pK}_2 = 7,20$; $\text{pK}_3 = 12,37$.



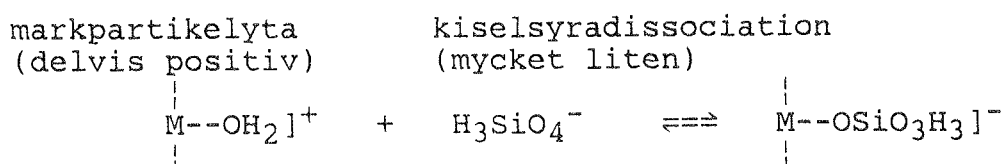
Figur 3. Adsorption av silikat- och fosfatanjoner på goetit vid olika pH-värden (Hingston et al., 1967) och kiselsyradissociation.

Figure 3. Adsorption of silicate and phosphate anions on goethite at different pH values (Hingston et al., 1967) and dissociation of monosilicic acid.

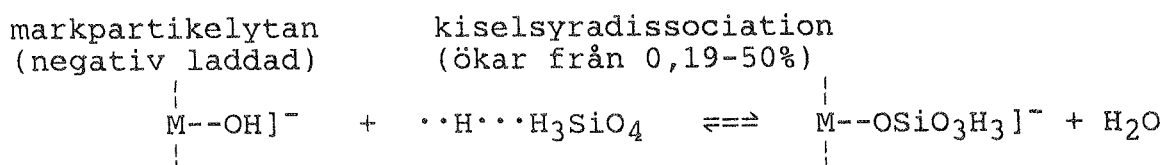
Resultaten av experimentet visar att

- a) pH-värdet i lösningen har ett inflytande på anjonadsorptionen,
- b) vid pH-värden större än 7 är adsorptionen av silikat större än av fosfat och tvärtom vid lägre pH-värden,
- c) silikatadsorptionen är större än kiselsyrans dissociationsgrad (streckad linje),
- d) adsorptionen av kiselsyra minskar vid pH-värden större än pK-värdet.

Vid anjonadsorption samverkar två mekanismer: dissociationen av syran och markpartiklarnas laddningsförhållande. Detta tillsammans gör anjonadsorption till ett komplicerat fenomen. Vid pH-värden mellan 3 och 7 är kiselsyra mycket svagt dissocierad (pH 3: 0,000019% ; pH 7: 0,19%). Trots detta förekommer en kraftig adsorption (se figur 3). Författarens hypotes är att de ytterst små dissocierade mängderna omedelbart binds och att nya joner hela tiden bildas för att upprätthålla dissociationsjämvikten. Andra mekanismer uteslutas inte. Markpartiklarna är positivt laddade inom detta pH-område. Adsorptionsmekanism vid pH 3 - 7:



Vid pH-värden mellan 7 och 9,77 ökar kiselsyrans dissociationsgrad från 0,19 till 50 %. Det föreligger ingen brist på negativt laddade silikatjoner. Markpartikelytan uppvisar dock inga positiva laddningar. Silikatjoner kan inte bli bundna under dessa förhållanden eftersom negativa laddningar ej attraheras. I stället antas att följande mekanism sker (Hingston et al., 1972; Mott, 1981). Adsorptionsmekanism vid pH 7 - 9,77 :

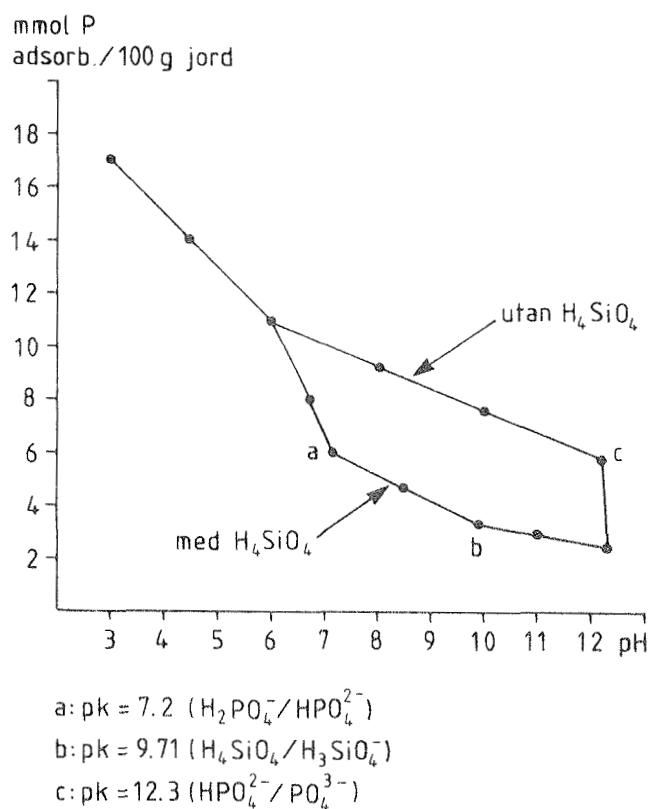


Vid pH-värden större än 9,77 ökar dissociationen av kiselsyra till över 50 %. Silikatanjoner är dominerande. Markpartiklarna är enbart negativt laddade. Det är alltså bara de oladdade och odissocierade kiselsyramolekylerna som kan reagera med partikelytan. Mekanismen är densamma som ovan. Eftersom andelen odissocierade molekyler minskar, sjunker adsorptionen vid pH-värden över 9,77.

Anjonkonkurrens

Olika anjoner kan konkurrera om samma adsorptionsplatser i marken. Obihara och Russel (1972) undersökte fosforadsorptionen i marken med och utan tillsats av kiselsyra (figur 4). De fann att fosforadsorptionen inte påverkades av en högre silikatkoncentration i markvätskan vid pH-värden lägre än 6,0. Vid högre pH-värden konkurrerade däremot silikat- och fosfatjoner och en fosformobilisering kunde mätas.

En kvantitativ jämförelse mellan koncentrationerna av fosfat- och silikatjoner vid olika pH-värden i marken har gjorts av författaren. De gemomsnittliga fosfathalterna i marklösningen i svenska åkerjordar (Lotse, 1986) har härvid jämförts med de maximalt och minimalt möjliga silikatjonkoncentrationer som är givna i avsnitt 1 i detta kapitel.

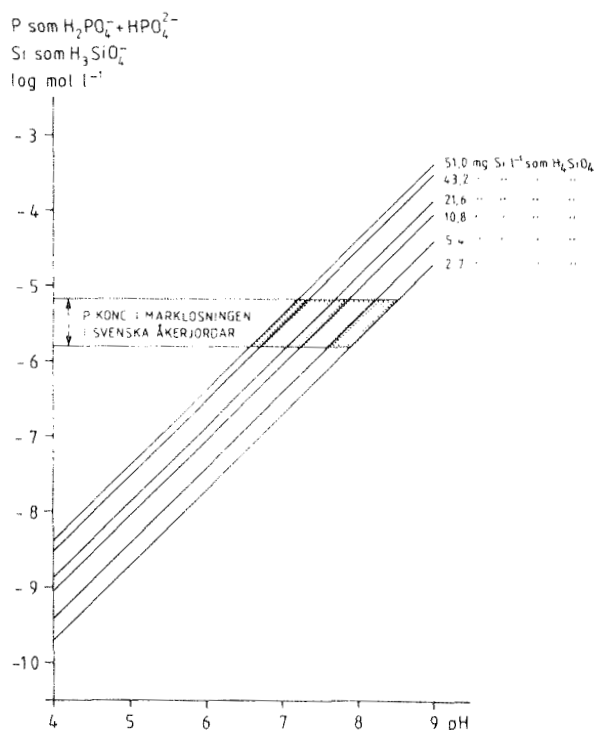


Figur 4. Inverkan av kiselsyra (H_4SiO_4) på fosfatadsorptionen i marken vid olika pH-värden. (Obihara och Russel, 1972.)

Figure 4. Effect of monosilicic acid (H_4SiO_4) on phosphate adsorption at different pH values. (Obihara and Russel, 1972.)

I figur 5 visas koncentrationer av silikat- och fosfatjoner vid olika kiselsyrahalter och pH-värden i marken. Vid pH-värde 4 och 5 är halten kiselsyrajoner 1000-10000 resp. 100-1000 gånger lägre än fosfatjonkoncentrationen. Det antas att konkurrensen därför måste vara mycket liten, oberoende av en höjning av kiselsyrahalten. Vid högre pH-värden ökar halten silikatjoner pga ökad dissociation och vid pH 6,5 kan halterna av fosfat- och silikatjoner vara lika stora. Den streckade delen i diagrammet indikerar intervallet där fosfat- och silikatjonkoncentrationer är lika stora.

Detta visar att trots den ringa dissociationen av kiselsyra vid pH 6,0-6,5, är koncentrationen av kiselsyrajoner av samma storlek som för fosfatjoner. Det föreligger en jonkonkurrenssituation vid pH-värden över 6,0-6,5. Om fosfatkoncentrationerna i marklösningen skulle vara ännu lägre än 0,01 mg per liter, förekommer konkurrensen även vid lägre pH-värden. Små öknings av kiselsyrahalten i marklösningen genom till exempel slaggtillsats kan därför inverka på adsorptionen av fosfor i marken.



Figur 5. Silikatanjon- (H_3SiO_4^-) och fosfatanjonkoncentration ($\text{H}_2\text{PO}_4^- + \text{HPO}_4^{2-}$) i marklösningen vid olika kiselsyrahalter och pH-värden.

Figure 5. Silicate anion (H_3SiO_4^-) and phosphate anion concentration ($\text{H}_2\text{PO}_4^- + \text{HPO}_4^{2-}$) in the soil solution at different levels of monosilicic acid and pH values.

Slutsatser

Fosfat- och silikatanjoner binds till specifika adsorptionsplatser på markpartiklar. Det föreligger ett konkurrensförhållande mellan dessa joner om samma adsorptionsställen.

Tre olika sätt att belysa denna situation har redovisats:

Adsorption av båda jonslagen på goetit

Adsorption av silikat- och fosfatjoner i marken

Jämförelse mellan koncentrationer av silikat- och fosfatjoner i marklösningen.

Resultaten är överensstämmande och visar att anjonkonkurrens mellan fosfat och silikat föreligger när pH-värdena i marken överstiger 6,0-6,5. Vid lägre pH-värden påverkades inte fosforadsorptionen av silikatnärvaron.

En granskning av de inledningsvis citerade försöken där silikattillsats inte gett någon effekt på fosforupptagningen i grödan, visar att pH-värdet i de använda jordarna låg under 6,0.

3. Förändring av markstruktur och porstorlek

Ökad halt av löst kisel syra i markvätskan åstadkommen genom tillsats av lösliga silikatföreningar leder till utfällning senast när jämviktskoncentrationen med amorf kisel (51 mg Si l^{-1}) överskrids (Elgawhary och Lindsay, 1972). Den utfällda kisel syran föreligger som ett polymeriserat, voluminöst och vattenrikt kiselgel. Som en följd härav skulle en eventuell förbättring av både markens struktur och porsystem kunna erhållas. Eftersom kiselgelet inte är en stabil och beständig förening utan 'åldras', blir effekten inte långvarig.

Få undersökningar inom detta området har utförts. Berggren (1965) bestämde aggregatstabiliteten i svenska lerjordar efter tillsats av både natrium- och kaliumsilikat. Inga signifikanta skillnader mellan obehandlade och silikatbehandlade jordar kunde påvisas. Däremot fann Dutt (1947) ökad aggregering i en mojord efter tillsats av kaliumsilikat. Andelen vattenstabila aggregat hade ökat men effekten försvann efter jordbearbetning. Gebhardt (1972) undersökte förändringarna av porstorleksfördelningen i en ler-, mo-, löss- och sandjord efter tillsats av stigande mängder silikater. I de undersökta jordtyperna kunde fler småporer påvisas efter silikattillsats. I sandjorden varade porerna i två år men bara ett år i de andra jordarna.

IV. KISEL I GRÖDAN

1. Upptagning i grödan

Kisel tas upp av växten som oladdad monokiselsyra (H_4SiO_4) ur marklösningen. Högre kiselhalter i mono- än i dikotyledoner och särskilt höga halter i ris tyder dock på att upptagningen kan ske på olika sätt för olika växter.

För monokotyledona jordbruksgrödor har en passiv kiselupptagning kunnat konstateras (Handreck och Jones, 1965, 1968; Hutton och Norrish, 1974; Schultz och French, 1976; Worm, 1980).

Löst oladdad kisel syra flödar med vatten in i växtrötterna och följer med transpirationsströmmen till ovanjordiska växt delar.

När växten avger vatten genom transpirationen fälls kisel syran ut. De utfällda kiselavlagringarna är amorfa kiselaggregat eller kisel av opaltyp med ett ljus-brytningsindex på 1,427 - 1,440 (Jones och Milne, 1963).

I tabell 5 visas halter och kisel syramängder i havreplantor odlade i en kisel syrarik respektive kisel syrafattig jord (Handreck och Jones, 1968). De relativa skillnaderna mellan jordarnas olika kisel syrahalt och de mängder som växterna hade tagit upp förblev desamma. Därav följer att kiselupptagningen har skett som ett passivt flöde med vattenupptagningen. Variationer i kiselhalt i de olika växt delarna förklaras av Handreck och Jones (1968) som ett resultat av en högre respektive lägre transpiration i organen. Kiselupptagning i havreplantor har använts som metod för transpirationsstudier (Aston och Jones, 1976). Om kiselupptagningen i monokotyledoner är proportionell mot både transpirationsflödet och halten löst kisel syra i marken, kommer plantans kiselupptagning att fortsätta tills transpirationen upphör. Detta har visats av Schnug och Franck (1984), se figur 6.

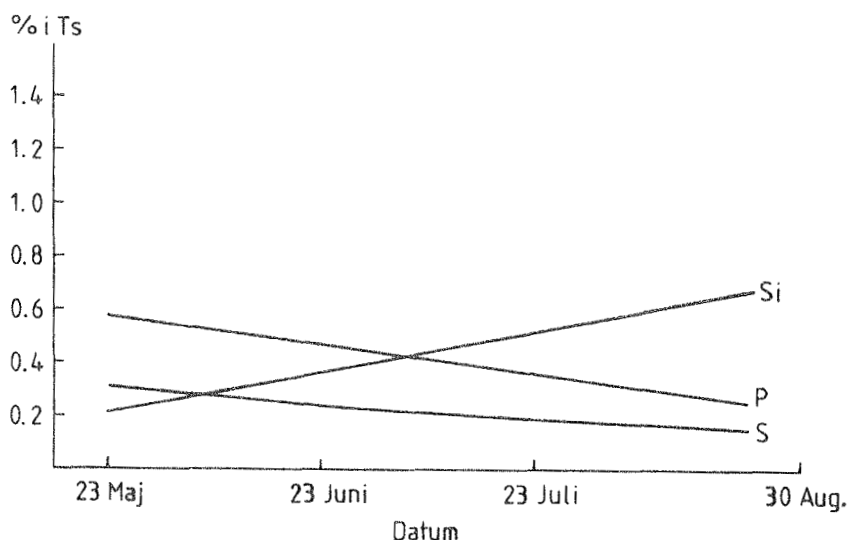
Tabell 5. Kiselhalt i skördemogna havreplantor (*Avena sativa* L.) odlade i jord med 107 mg (jord A) och 11 mg (jord B) H_4SiO_4 per liter marklösning (efter Handreck och Jones, 1968)

Table 5. Silicon content of oat plants (*Avena sativa* L.) cropped in soil with 107 mg (soil A) and 11 mg (soil B) H_4SiO_4 per liter soil solution (after Handreck and Jones, 1968)

Växt del Plant part	Jord A H_4SiO_4		Soil A 107 mg l^{-1}		Jord B H_4SiO_4		Soil B 11 mg l^{-1}	
	% Si i Ts in DM	mg Si per växt del plant part	% Si i Ts in DM	mg Si per växt del plant part	% Si i Ts in DM	mg Si per växt del plant part	% Si i Ts in DM	mg Si per växt del plant part
Bladskiva, leaf blade	2,5	32,8	0,21	2,9	0,21	2,9	0,21	2,9
Bladslida, leaf sheath	1,9	21,6	0,18	2,2	0,18	2,2	0,18	2,2
Strå, stem	0,5	12,7	0,04	0,9	0,04	0,9	0,04	0,9
Inneragnar, rachis	4,3	11,7	0,37	0,9	0,37	0,9	0,37	0,9
Ytteragnar, palea	3,6	26,6	0,46	2,9	0,46	2,9	0,46	2,9
Fröskal, empty glumes	5,0	6,3	0,82	0,9	0,82	0,9	0,82	0,9
Kärna, caryopsis	0,03	0,6	0,005	0,09	0,005	0,09	0,005	0,09
Borst, awn	3,2	1,5	0,35	0,1	0,35	0,1	0,35	0,1
Övriga delar, other parts	1,9	3,3	0,24	0,9	0,24	0,9	0,24	0,9
Hela toppskott, genomsnitt	1,35	117,1	0,14	11,79	0,14	11,79	0,14	11,79
Whole top parts, average								

Kiselhalten ökar från mycket låga koncentrationer vid början av växtens utveckling till allt högre halter under tillväxten medan halterna av växtnäringsämnen sjunker. Upptagningsförloppet för kisel skiljer sig därmed från de andra ämnena. Äldre växtdelar innehåller mera kisel än unga. Ett experiment av Barber och Shone (1966), som använde sig av korn (*Hordeum vulgare* L.) visade dock att växtens kiselupptagning kunde vara större än det passiva flödet med transpirationsströmmen. Vid hög luftfuktighet kunde upptagningen vara större än vid låg och normal luftfuktighet och stod inte i relation till näringslösningens kiselkoncentration. Möjligheten av ett aktivt kiselupptagande hos monokotyledoner kan därmed inte helt uteslutas. Vid användning av lösliga silikater till bladgödsling noterades enbart små eller inga förändringar av växternas kiselhalt (Schnug och Frank, 1985).

En större kiselsyrapptagning har kunnat mätas i ris (*Oryza sativa* L.) med halter mellan 5 och 10 procent kisel i torrsubstansen (Islam och Saha, 1969). En mekanism för ett aktivt kiselupptagande hos ris förmodas (Jones och Handreck, 1967). I dikotyledoner, t. ex. leguminoser, har mycket låga kiselhalter påvisats. Jones och Handreck (1969) fann att enbart 5 procent av näringslösningens kiselsyra togs upp av blodklöver (*Trifolium incarnatum* L.). Mycket låga halter kunde också påvisas i ärtor (*Pisum sativum* L.), men växtens kiselhalt ökade efter det att rötterna hade blivit avklippta och den rotlösa plantan placerades i en kiselsyrarik näringslösning (Parry och Winslow, 1977). Dessa resultat stämmer överens med Jones och Handrecks hypotes (1969) att leguminosrötter har en selektiv barriär på rotens utsida som förhindrar kiselsyrans inflöde.



Figur 6. Kisel-, fosfor- och svavelhalter i höstveten vid olika utvecklingsstadiet. (Schnug och Franck, 1984.)

Figure 6. Silicon, phosphorus and sulphur content in winter wheat at different stages of plant development. (Schnug and Franck, 1984.)

2. Utfällning i plantor

När kiselsyran, som är löst i växtsaften, blir övermättad pga plantans vattenavdunstning, kan kiselsyran polymeriseras och fällas ut som amorf kisel. För att polymerisation skall kunna ske måste kiselkoncentrationen vid pH-värdet 6,8-7,0 ligga mellan 50-150 milligram per liter (Kaufman et al., 1981). Analyser av xylemsaft i olika växter har visat att Si-halterna kan vara så höga som 350 milligram per liter men variationer mellan 75-200 är det normala (Kaufman et al., 1981).

Tre olika typer av kiselavlagringar har observerats i växter (Yoshida et al., 1962a,b; Jones et al., 1963; Parry och Smithson, 1964; Lanning et al., 1980; Sangster och Parry, 1981):

- a) runda, rektangulära, elliptiska, avlånga eller sadelformade kiselkroppar i celler av opal typ, så kallade opala fytoliter,
- b) oregelbundna avlagringar av amorf kisel mellan celler (intercellulär),
- c) koniska eller sfäriska aggregat i cellens inre rum (lumen) av amorf kisel.

De olika kiselavlagringarna illustreras i figur 7.

Opala fytoliter har huvudsakligen identifierats i bladerpidermis i olika gräs men även i andra ovanjordiska växtorgan hos monokotyledoner. Karakteristiska fytolitformer har kunnat identifierats för 'torrmarks'- och 'våtmarks'-gräs. Klassificering av opala former har möjliggjort att tidigare vegetationstyper på marken, sediment eller havsbotten delvis kan bestämmas genom analys av befintliga fytoliter. (Twiss et al., 1969). Intercellulär amorf kisel har observerats i gräsrötter. Avlagringen sker först på utsidan av cellväggar, förtjockas med plantans ålder och växer sedan ihop. Avlagringsprocessen är därmed centripetal. Koniska eller sfäriska kiselaggregat förekommer huvudsakligen i cellväggar. De har hittats i endodermis i gräsrötter, i bladerpidermis hos spannmål, i endodermis i sockerrör, i strån och bladslideceller.

3. Funktioner i plantan

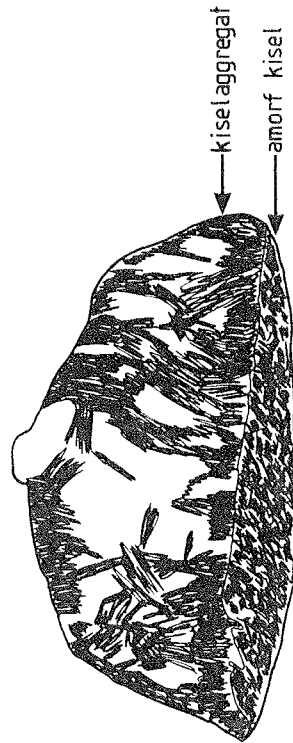
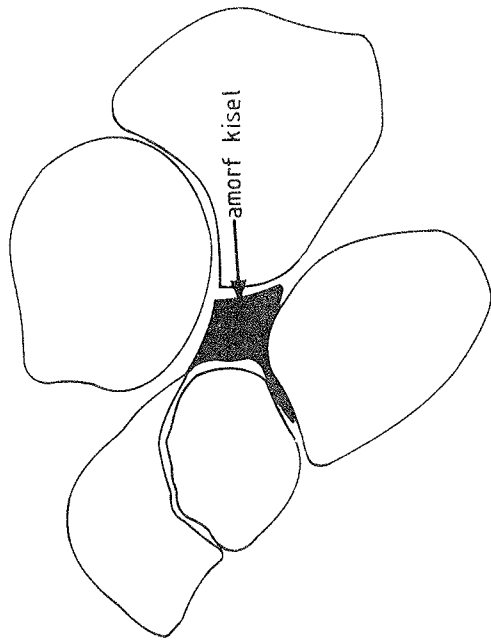
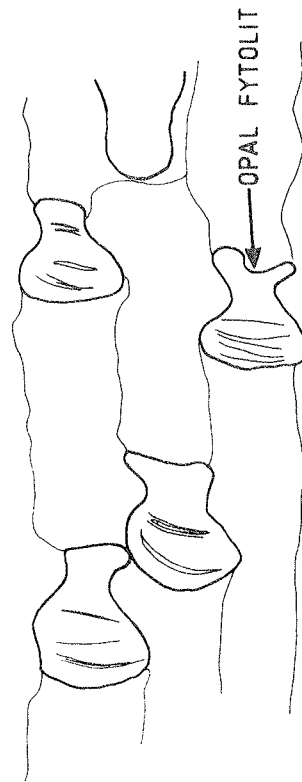
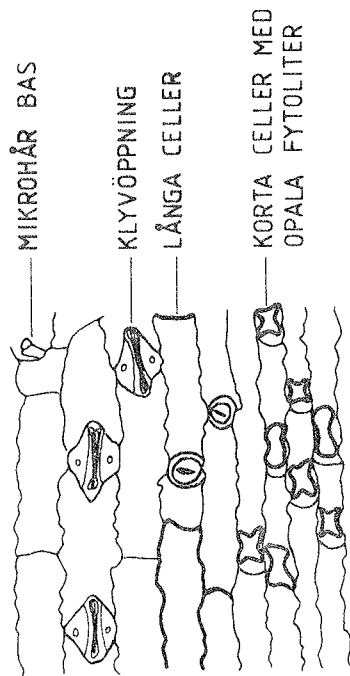
Olika funktioner hos kisel i växter omnämns i litteraturen, men uppgifter om kiselns delaktighet i plantans metaboliska eller biokemiska reaktioner finns hitills inte. Alla beskrivna funktioner är uteslutande av mekanisk eller fysikalisk natur. Följande kisel-funktioner i plantan är beskrivna:

- Stabilisering av växtvävnad
- Försvar mot patogener
- Inverkan på transpiration
- 'Fönstereffekt'

Stabilisering av växtvävnad

Liggsäd, som kan medföra stora skördeförluster, ansågs av Liebig (1840) vara förorsakad av brist på kisel i strået. Hypotesen har diskuterats (Scharer et al., 1954; Jones

BLADEPIDERMIS



Figur 7. Tre olika typer av kiselavlagringar i växten: opala fytoliter, amorf kisel mellan celler, kiselaggregat i cellrum (efter Twiss et al., 1969; Sangster och Parry, 1981; Kaufman et al., 1981).

Figure 7. Three types of silicate deposition in plants: opal phytolite, amorphous silica between cells, silica aggregates in the lumen.

och Handreck, 1967) men variationerna i stråstyrkan har ofta kunnat förklaras med anatomiska egenskaper såsom strådiameter och stråcellväggens tjocklek (Mulder, 1954). Kiselhalten i strån står dock i relation till löst kiselsyra i markvätskan (se tabell 5). Det föreligger därmed skillnader i plantvävnad beträffande den avlagrade kisel mängden. För att undersöka stråstyrkan hos spannmål med olika kiselhalter konstruerades av Zeid och Kuhn (1971) en speciell apparatur med vilken den mekaniska kraften för att bryta spannmålstrån kunde mätas. Växtematerialet, som användes för denna undersökning, hade odlats på en kiselsyrafattig jord, som gödslades med kalk, masungsslagg och löst kiselsyra i olika kombinationer. Kiselhalterna i spannmål var högst efter användning av masungsslagg. Vridmomenten för att bryta strån var större för de kiselrika växterna. I genomsnitt kunde vid alla mätstillfällena en större halmstabilitet (ca 6 %) hos silikatbehandlade grödor registreras. Ett liknande försök gjordes av Idris et al. (1975). Kraften för att bryta strån av ris efter kisel tillsats mättes. Också i detta experiment visade det sig att de silikatgödslade plantorna hade en signifikant större stråstabilitet än de kiselfattiga. Det föreligger alltså ett samband mellan kiselhalt i strån och deras mekaniska egenskaper.

Ett mycket åskådligt exempel på kiselns stabilitetsfrämjande effekt på växtvävnad föreligger hos åkerfräken (*Equisetum arvense* L.). Vid frånvaro eller brist på kisel förmår varken strån eller blad växa upprätt respektive utsträckt. Hela plantan växer i liggande utbredd form på odlingsmediet och det finns ingen strukturstyvhet. Kisel anses därför vara ett essentiellt ämne för denna växt (Chen och Lewin, 1969). Ytterligare en stabiliserande effekt hos kisel på växter har observerats i form av ökad bladstyvhet. Sambandet mellan kisel- och kvävegödsling på bladsträckning respektive styvhet hos ris (*Oryza sativa* L.) har undersökts av Yoshida et al., (1969). Vid låga kiselhalter i risplantor var bladen mindre styva än vid högre halter. Konsekvensen av minskad bladstyvhet hos ris resulterade i en hängigare bladställning med en lägre grad av ljusutnyttjande. Den reducerade fotosyntesaktiviteten sänkte biomassaproduktionen.

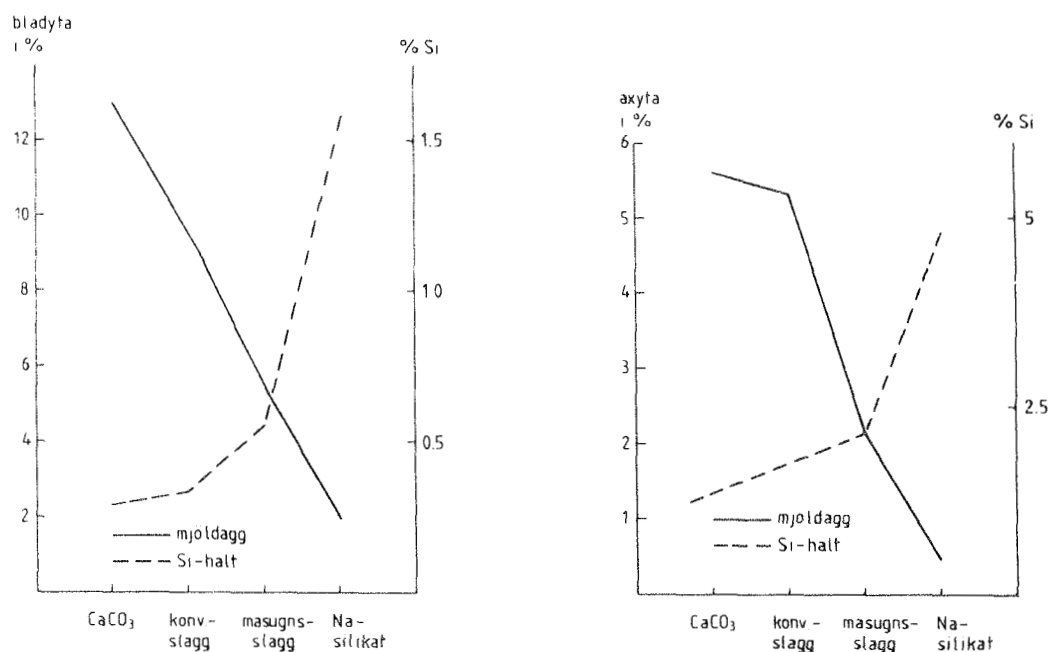
Försvar mot patogener

Växterna har ett utomordentligt försvarssystem och visar resistens gentemot många patogener. Flera olika resistensmekanismer är kända (Horsfall och Cowling, 1980). Frågan om även kisel i cellväggar kan öka växtens resistens gentemot svamp- och skadedjurangrepp har ofta ställts och har varit föremål för flera undersökningar. Det föreligger tidiga observationer om ett samband mellan växtens kiselhalt och patogenangrepp (McColloch och Salmon, 1923 cit. av Lanning 1966a; Lowig, 1936).

Av litteraturen framgår att kisel både kan spela en aktiv och passiv roll vid försvaret mot patogener. Som passiv funktion betraktas kiselavlagringar i och mellan cellerna. De förra kan utgöra ett fysiskt hinder. Som aktiv funktion ses den snabba kiselackumuleringen kring svamparnas penetrationsställen i växtvävnaden.

Om kiselavlagringar i plantan utgör en mekanisk barriär för skadegörare, måste det finnas en relation mellan kiselhalten och patogenangrepp. Detta möjliga samband har studerats under kontrollerade betingelser för kornmygga (*Mayetiola destructor*) på vete (*Triticum aestivum* L.) av Lanning (1966a); 'greenbug' (*Schizaphis graminum*) på korn (*Hordeum vulgare* L.) av Lanning (1966b); sniglar (*Agriolimax reticulatus* Muller) på ris (*Oryza sativa* L.) av Wadham och Parry (1981); och fritflugor (*Oscinella frit* och andra species) på rajgräs (*Lolium multiflorum* L.) av Moore (1984). För 'greenbug' och kornmygga har ingen korrelation kunnat konstateras däremot för sniglar och fritflugor. Små förändringar i kiselhalten hos rajgräs från 0.51 till 0.56 % Si i torrsubstansen sänkte angreppen drastiskt. Sniglars konsumtionen av risblad sänktes vid höga kiselhalter. Även andra fysiologiska egenskaper spelar dock en stor roll och kan dölja effekten.

Också beträffande svampangrepp och kiselhalt i plantan har en korrelation kunnat fastställas (Mielke och Finger, 1977; Leusch och Buchenauer, 1984). I figur 8 illustreras resultat av Leusch och Buchenauers undersökning (1984). Författarna tillförde marken konverter- och masugnsslugg, kalkstensmjöl och natrium-silikat och bestämde både kiselhalter i vårvete och storleken av mjöldaggs- (*Erysiphe graminis*) och septoriaangrepp (*Septoria nodorum*). De fann ett klart samband mellan mjöldaggsangrepp och kiselhalten. Signifikanta effekter på septoriaangrepp kunde enbart fastställas för natriumsilikatgödslade plantor.



Figur 8. Samband mellan vårvetets kiselhalt och mjöldaggangrepp på blad respektive ax efter olika kalk- och silikatgödsling. (Efter Leusch och Buchenauer, 1984.)

Figure 8. Relationship between silicon content of spring wheat and powdery milders infection on leaves and glumes after different lime and silicate applications to the soil. (After Leusch and Buchenauer, 1984.)

Mjöldaggens penetrationsställen i växtvävnad med avseende på kisel har detaljstuderats av Kunoh och Ishizaki, (1975,1976). Med hjälp av röntgenmikroanalys kunde de visa att det sker en kisel-, kalcium- och manganackumulation inom 12 timmar där svamphyferna hade trängt in i växtens epidermisceller. Kisel ansamlas först kring den ännu inte utformade papillan och senare i hela papillan. Den snabba ackumulationen tyder på en dynamisk reaktion hos växtcellen gentemot svampangrepp.

Hanisch (1980) visade att bladgödsling med natriumsilikat före uppträdandet av bladlöss kunde sänka antalet sädesbladlöss (*Sitobion arvenae*) med 60 och av grönstrimmiga gräsbladlöss (*Metopolophium dirhodum*) med 30 procent. En fördubbling av kiselhårceller på epidermisskiktet konstaterades efter behandlingen.

Inverkan på transpiration

Kontinuerligt minskande transpiration hos ris (*Oryza sativa* L.) vid stigande kiselhalter i näringslösningen har observerats av Yoshida et al. (1959) och Okunda och Takahashi (1964, cit. av Jones and Handreck, 1967). Okunda och Takahashi (1964) gjorde mätningar under en 2 månaders period med kiselhalter varierande från 0 till 47 milligram Si per liter näringslösning. Transpirationen per dygn sänktes från 5,1 ml per gram friskvikt utan kisel till 3,6 ml per gram vid 47 milligram Si. Mekanismen bakom transpirationssänkningen är inte klarlagd. Yoshida et al. (1962) och Yoshida (1965, cit. av Jones and Handreck, 1967) förmodar att silikatavlagringar i epidermisceller ökar vaxavlagringar på bladytan.

'Fönstereffekt'

En inte tidigare i litteraturen beskriven effekt av silikatavlagringar i blad och strå har observerats av Kaufman et al. (1981). De fann att kiselceller i epidermisvävnad möjliggjorde en bättre ljustransmission till fotosyntesvävnad, som ligger under epidermisskiktet, jämfört med celler utan kiselavlagring. Upptäckten har beskrivits som fönstereffekt och fastställdes på sockerrör (*Saccharum officinarum* L.). Mellan olika socker-rörsorter kunde stora skillnader i mängden kiselavlagringar konstateras. Kaufman et al. (1981) menar att sorter med kraftig kiselavlagring har en större fotosynteskapacitet än sorter med låg kiselhalt.

4. Inflytande av kisel syra på upptagning av andra näringsämnen

Tillsats av kisel syra till näringslösningar kan resultera i att upptagningen av andra näringsämnen förändras. För korn (*Hordeum vulgare* L.) har en interaktion mellan manganupptagning och kisel syra observerats (Williams och Vlamis, 1957). Toxiska symptom på bladen av för höga manganhalter uteblev vid tillsats av kisel syra till näringslösningen. Effekten kunde också observeras hos råg (*Secale cereale* L.), havre (*Avena sativa* L.), vete (*Triticum aestivum* L.) dock inte hos

ris (*Oryza sativa* L.) och rajgräs (*Lolium multiflorum* L.), (Vlamis och Williams, 1967). Det föreligger ett växelspel mellan kiselsyra och mangan- eller aluminiumupptagning hos tomater (*Lycopersicum esculentum* L.), (Peaslee och Frink, 1969). Frågan om de observerade resultaten beror på en kemisk reaktion mellan kiselsyra och löst mangan respektive aluminium i näringslösningen eller på en metabolisk påverkan av växten genom kiselsyra undersöktes av H Marschner (1978). De fann att det föreligger en större tolerans hos bönor (*Phaseolus vulgaris* L.) mot höga manganhalter i växten när också silikathalterna är höga. Samspelet mellan kisel- och fosforupptagningen hos vete odlad i vattenkultur studerades av Rotbuhr och Scott (1957). Efter tillförsel av pulveriserad kvarts till näringslösningen kunde något högre fosforupptagning registreras. Någon möjlig hypotes, som förklarar resultatet, anges inte av författarna. Effekten av kisel på den kemiska sammansättningen hos ris (*Oryza sativa* L.) odlad i vattenkultur undersöktes av Islam och Saha (1969). Tillsats av kisel resulterade i sänkta kväve-, kalium-, järn- och manganhalter. Fosfor-, kalcium- och magnesiumhalterna ökade däremot.

V. REFERENSER

- Achromeiko, A.I. 1934. Einfluss der Kieselsäure auf die Ausnutzung der P_2O_5 verschiedenen Ursprungs durch die Pflanze. Z. Pfl.ernähr. Düngung Bodenk. 34:34-359
- Aston, M.J. och M.M.Jones. 1976. A study of the transpiration surfaces of *Avena sterilis* L. var. Algerian leaves using monosilicic acid as tracer for water movement. Planta (Berl.) 130:121-129.
- Ayres, A.S. 1965. Calcium silicate slag as a growth stimulant for sugarcane on low-silicon soils. Soil Sci. 101:216-227.
- Barber, D.A. och M.G.T.Shone. 1966. The absorption of silica from aqueous solutions by plants. J. Exp. Bot. 17:569-578.
- Beckwith, R.S. och R.Reeve. 1963. Studies on soluble silica in soils. 1.Part. Aust.J. Soil Res. 1:157-168.
- Beckwith, R.S. och R.Reeve. 1964. Studies on soluble silica in soils. 2.Part. Aust.J. Soil Res. 2:33-45.
- Berggren, B. 1965. Strukturförändringar hos en silikatbehandlad lerjord. Specialmeddelande 13, Jordbrukstekniska institutet. Uppsala, Sweden.
- Birch, H.F. 1953. Phosphate response, base saturation and silica relationships in acid soil. J. Agr. Sci. 43:229-235.
- Brown, G.G. 1967. The production and properties of basic slag. Fert. Soc. Lond. Proceed. 96:1-56.
- Chen, C. och J. Lewin. 1969. Silicon as a nutrient element for *Equisetum arvense*. Can. J. Botany 47:125-131.
- Cooke, G.W. 1956. The effect of some silicate slags on the utilisation of soil and fertiliser phosphorus. J. Sci. Food Agric. 7:56-61.
- Dutt, A.K. 1947. The effekt of water-soluble potassium silicate and various other treatments on soil structure and crop growth. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 12:497-501.
- Eitel, W. 1954. The physical chemistry of the silicates. Chicago press, Chicago, Illin.
- Elgawhary, S.M. och W.L. Lindsay. 1972. Solubility of silica in soils. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 36:439-442.
- Fidanovski, F. 1968. Silicium ein für Pflanzen nützliches Element. Z. Pfl.ernähr. Bodenkunde 120:191-207.
- Ganssmann, W. Untersuchungen über den Einfluss der Kieselsäure auf die Aufnahme von Phosphorsäure und anderen Nährstoffen. Phosphorsäure 22:223-241.
- Gebhardt, H. 1972. Physikalische und chemische Wirkung von Bodenverbesserungsmitteln auf Kieselsäurebasis. Mitteilgn. Dtsch. Bodenkundl. Gesellsch. 15:225-245.
- Grauhe, G. och F. Oberlies. 1970. Beitrag zum Wirkungsmechanismus von Thomasphosphat und Hüttenkalk im Erdboden. Thyssenforschung 1:26-34.
- Handreck, K.A. och L.H.P. Jones. 1968. Studies of silica in the oat plant. Part IV. Plant Soil 29:449-459.
- Hanisch, H.C. 1980. Untersuchungen zum Einfluss der N-Düngung und Spritzung von Natriumsilikat zu Weizen auf die Populationsentwicklung von Getreideblattläusen. Diss. Giessen, Västtyskland.
- Hingston, F.J., R.J. Atkinson, A.M. Posner och J.P. Quirk. 1967. Specific Adsorption of anions. Nature 215:1459-1461.

- Hingston, F.S., A.M. Posner och J.P. Quirk. 1972. Anion adsorption by goethite and gibbsite. *J. Soil Sci.* 23:177-192.
- Horsfall, J.G. och E.B. Cowling. 1980. Plant disease - an advanced treatise. How plants defend themselves. Vol V. Academic Press, New York.
- Horst, W.J. och H. Marschner. 1978. Effects of silicon on manganese tolerance of bean plants (*Phaseolus vulgaris* L.) *Plant Soil.* 50:287-303.
- Hunter, A.S. 1965. Effects of silicate on uptake of phosphorus from soils by four crops. *Soil Sci.* 100:391-396.
- Hutton, J.T. och K. Norrish. 1974. Silicon content of wheat husks in relation to water transpired. *Aust. J. Agric. Res.* 25:203-212.
- Idris, M., M.M. Hossain och F.A. Choudhury. 1975. The effect of silicon on lodging of rice in presence of added nitrogen. *Plant Soil.* 43:691-695.
- Islam, A. och R.C. Saha. 1969. Effects of silicon on the chemical composition of rice plants. *Plant Soil* 30:446-458.
- Jessen, W. och W. Lesch. 1930. Über den Einfluss von Kieselsäure, Torf und Humus auf die Löslichkeit und Aufnahme der Phosphorsäure. *Z. Pfl. ernähr. Düngung Bodenk.* 17:48-66.
- Jokinen, R. 1982. The efficiency of dolomitic limestone, basic slag and peat ash as liming agents, and as calcium and magnesium sources for turnip rape. *J. Scient. Agric. Soc. Finl.* 54:371-383.
- Jones, L.H.P. och K.A. Handreck. 1963. Effects of iron and aluminium oxides on silica in solutions in soils. *Nature* 198:852-853.
- Jones, L.H.P. och K.A. Handreck. 1965. Studies of silica in the oat plant. Part III. *Plant Soil.* 23:79-96.
- Jones, L.H.P. och K.A. Handreck. 1967. Silica in soils, plants and animals. *Adv. Agron.* 19:107-149.
- Jones, L.H.P. och K.A. Handreck. 1969. Uptake of silica by *Trifolium incarnatum* L. in relation to the concentration in the external solution and to transpiration. *Plant soil.* 30:71-80.
- Jones, L.H.P. och A.A. Milne. 1963. Studies of silica in the oat plant. Part I. *Plant Soil.* 18:207-220.
- Jones, L.H.P., A.A. Milne och S.M. Wadham. 1963. Studies of silica in the oat plant. Part II. *Plant Soil.* 18:358-371.
- Kappen, H. 1950. Die Hochofenschlacke. Verlag Paul Parey, Berlin.
- Kaufman, P.B., P. Dayanandan, Y. Takeoka, W.C. Bigelow, J.D. Jones och R. Iler. 1981. Silica in shoots of higher plants. p 409-449. In T.L. Simpson and B.E. Volcani (eds.) *Silicon and siliceous structures in biological systems.* Springer press, New York.
- Kunoh, H. och H. Ishizaki. 1975. Silicon levels near penetration sites of fungi on wheat, barley, cucumber and morning glory leaves. *Physiological Plant Pathol.* 5:283-287.
- Kunoh, H. och H. Ishizaki. 1976. Accumulation of chemical elements around the penetration sites of *Erysiphe graminis hordei* on barley leaf epidermis: (III) micromanipulation and x-ray microanalysis of silicon. *Physiological Plant*

- Pathol. 8:91-96.
- Körber, F. och G. Trömel. 1943. Forschungen über den Aufbau der Phosphatschlacken und ihre Bedeutung für die Thomas-mehlerzeugung. Archiv f. Eisenhüttenwesen 7: 7.
- Lanning, F.C. 1966a. Relation of silicon in wheat to disease and pest resistance. J. Agric. Food Chem. 14:350-352.
- Lanning, F.C. 1966b. Relation of silicon in barley to disease, cold, and pest resistance. J. Agric. Food Chem. 14:636-638.
- Lanning, F.C., T.L. Hopkins och J.C. Loera. 1980. Silica and ash content and depositional patterns in tissues of mature Zea mays L. plants. Ann. Bot. 45:549-554.
- Laws, D.W. 1950. Water-soluble silicate application to a calcareous clay soil and effect on soil properties and nutrient uptake by plants. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 15:89-92.
- Lemmermann, O., H. Wiessmann och K. Sammet. 1925. Untersuchungen über die Ursache der ertragssteigernden Wirkung der Kieselsäure. Z. Pfl. ernähr. Düngung 4:265-315.
- Leusch, H.J. och H. Buchenauer. 1984. Einfluss von Natrium-silikat und silikatreichen Kalken auf den Befall von Weizen mit Erysiphe graminis & Septoria nodorum. Med. Fac. Landbouww. Rijksuniv. Gent. 49:329-339.
- Lewin, J. och B.E.F. Reiman. 1969. Silicon and plant physiology. p 289-304. In L. Machlis (ed.) Annual review of plant physiology, 20. Palo Alto, Calif.
- Liebig, J.v. 1840. Chemistry in its application to agriculture and physiology. Taylor and Walton, London.
- Lindsay, W.L. 1979. Chemical equilibria in soils. Johan Wiley & Sons, New York.
- Lotse, E.G. 1986. Muntligt meddelande. Sveriges Lantbruksuniversitet. Inst. för markvetenskap, avd. för marklära. Uppsala.
- Lowig, E. 1936. Der Einfluss des Kieselsäuregehaltes auf den Mehлтаubefall der Gramineen. Pflanzenbau, 13:362-367.
- Mielke, H. och H. Finger. 1977. Entwicklung der Pyknidien- und Pyknosporenbildung von Septoria nodorum Berk. unter Einfluss von verschiedenen Kakformen und Kalimengen. Kali-Briefe 13: Fachgebiet 12/3.
- Miller, R.W. 1967. Soluble silica in soils. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 31:46-50.
- 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.
- Mott, C.J.B. 1981. Anion and ligand exchange. s 179-219. In D.J. Greenland and M.H.B. Hayes (ed.) The chemistry of soil processes. John Wiley & Sons, New York.
- Mulder, E.G. 1954. Effect of mineral nutrition on lodging of cereals. Plant Soil. 5:246-306.
- Munk, H. 1971. Composition and properties of compounds in basic slags. Agri Digest 22:13-21.
- Munk, H. 1981. Zur Bedeutung silikatischer Stoffe bei der Düngung landwirtschaftlicher Kulturpflanzen. Landw. Forschung, Sonderheft 38:64-77.
- Munk, H. 1986. Skriftligt meddelande. Versuchsanstalt Kamperhof, Landwirtschaftliche Beratung Thomasdünger. Mülheim, Väst-tyskland.
- Obihara, C.H. och E.W. Russel. 1972. Specific adsorption of silicate and phosphate by soils. J. Soil Sci. 23:105-117.

- Parry, D.W. och F. Smithson. 1964. Types of opaline silica depositions in the leaves of British grasses. *Ann. Bot.* 28:169-185.
- Parry, D.W. och A. Winslow. 1977. Elektron-probe microanalysis of silicon accumulation in the leaves and tendrils of *Pisum sativum* L. following root severance. *Ann. Bot.* 41: 275-278.
- Peaslee, D.E. och C.R. Frink. 1969. Influence of silicic acid on uptake of Mn, Al, Zn, and Cu by tomatoes (*Lycopersicum esculentum*) grown on an acid soil. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 33:569-571.
- Reifenberg, A. och S.J. Buckwold. 1954. The release of silica from soils by the orthophosphate anion. *J. Soil Sci.* 5: 106-115.
- Rotbuhr, L. och F. Scott. 1957. A study of the uptake of silicon and phosphorus by wheat plants with radiochemical methods. *Biochem. J.* 65:241-245.
- Roy, A.C., M.Y. Ali, R.L. Fox och J.A. Silva. 1971. Influence of calcium silicate on phosphate solubility and availability in Hawaiian latosols. *Int. Symp. Soil Fert. Evaluation, New Delhi (India)*, 1:757-765.
- Russell, E.W. 1973. *Soil Conditions and Plant Growth*. Longman, London.
- Sadiq, M., B.E. Bledsoe och C.G. Enfield. 1980. Solubility relationships of silica in soils. *Commun. Soil Sci. Pl. Anal.* 11: 317-326.
- Sangster, A.G. och D.W. Parry. 1981. Ultrastructure of silica deposits in higher plants. s. 383-407. In L. Simpson och B.E. Volcani (ed.) *Silicon and Siliceous structures in Biological systems*. Springer Verlag, Berlin.
- Schachtschabel, P. och C.G. Heinemann. 1967. Wasserlösliche Kieselsäure in Lössböden. *Z. Pfl. ernähr. Bodenk.* 118: 22-35.
- Scharrer, K.S., S. Gericke och H. Groenewold. 1954. Die Standfestigkeit des Getreides unter dem Einfluss der Stickstoff- und Phosphorsäuredüngung. *Phosphorsäure* 14:69-90.
- Scheffer, K. 1977. Der Einfluss von Kieselsäure auf die Mobilität verschiedener Phosphatdünger auf kalkhaltigem Boden. *Mitteilgn. Dtsch. Bodenkundl. Gesellschaft.* 25: 321-332.
- Scheffer, K., A. Schreiber och R. Kickuth. 1980. Die sorptive Bindung von Düngerphosphaten im Boden und die phosphatmobilisierende Wirkung der Kieselsäure. 1. Mitteilung. *Arch. Acker- Pflanzenbau Bodenk.* 12:799-814.
- Scheffer, K., A. Schreiber och R. Kickuth. 1982. Die sorptive Bindung von Düngerphosphaten im Boden und die phosphatmobilisierende Wirkung der Kieselsäure. 2. Mitteilung. *Arch. Acker- Pflanzenbau Bodenk.* 26:143-152.
- Schnug, E. och E.V. Franck. 1984. Bedeutung nützlicher Silizium-Effekte für intensiv angebaute landwirtschaftliche Kulturpflanzen. *Mitteilgn. Dtsch. Bodenkundl. Gesellsch.* 39:47-52.
- Schnug, E. och E.V. Franck. 1985. Untersuchungen zur Silicium-Versorgung von Kulturpflanzen in Schleswig-Holstein. *Z. Pfl. ernähr. Bodenk.* 148:1-9.
- Schollenberger, C.J. 1922. Silica and silicates in relation to

- plant growth and composition. *Soil Sci.* 14:347-362.
- Schultz, J.E. och R.J. French. 1976. Silicon uptake by wheat and its relation to grain yield and water use. *Aust. J. Exp. Agric. Anim. Husb.* 16:123-128.
- Stählin, A. och H. Tirtapradja. 1971. Über die Aufnahme und Einlagerung von Silizium in Futtergräsern. *Z. Acker- und Pflanzenbau* 134:295-312.
- Torstensson, G. och S. Alvelid. 1952. Om användning av masugnsslagg som kalkningsmedel i jordbruket. *Kungl. Lantbr.-akad. tidskr.* 91:57-76.
- Toth, S.J. 1937. Anion adsorption by soil colloids in relation to changes in free iron oxides. *Soil Sci.* 44:299-314.
- Toth, S.J. 1939. The stimulating effects of silicates on plant yields in relation to anion displacement. *Soil Sci.* 47:123-141.
- Trömel, G. och Ch. Zaminer. 1959. Untersuchungen an den Kristallen der Thomasschlacke. *Archiv f. Eisenhüttenwesen* 30:205.
- Twiss, P.C., E. Suess och R.M. Smith. 1969. Morphological classification of grass phytoliths. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 33:109-115.
- Uhlen, G. 1974. The effect of calcium silicate in barley pot experiments. *J. Scient. Agric. Soc. Finl.* 46:296-306.
- Vlamis, J. och D.E. Williams. 1967. Manganese and silicon interaction in the Gramineae. *Plant Soil.* 27:131-140.
- Wadham, M.D. och D.W. Parry. 1981. The silicon content of *Oryza sativa* L. and its effect on the grazing behaviour of *Agriolimax reticulatus* Muller. *Ann. Bot.* 48:399-402.
- Wiklander, L. 1976. Marklära. Sveriges Lantbruksuniversitet, Inst. för markvetenskap. Uppsala, Sverige.
- Wildhagen, H. 1975. Erhöhung der Mobilität und Exhauribilität von Boden- und Dünger-P durch Kalke und lösliche SiO₂-Formen. *Mitteilgn. Dtsch. Bodenkundl. Gesellsch.* 22:411-418.
- Williams, D.E. och J. Vlamis. 1957. The effect of silicon on yield and manganese-54 uptake and distribution in the leaves of barley plants grown in culture solution. *Plant Physiol.* 32:404-409.
- Worm van der, P.D.J. 1980. Uptake of Si by five plant species, as influenced by variations in Si-supply. *Plant Soil* 56:153-156.
- Yoshida, S., Y. Ohnishi och K. Kitagishi. 1962a. Histochemistry of silicon in the rice plant. II. Localisation of silicon within rice tissues. *Soil Sci. Pl. Nutr.* 8:15-21.
- Yoshida, S., Y. Ohnishi och K. Kitagishi. 1962b. Histochemistry of silicon in the rice plant. III. The presence of a cuticle-silica double layer in the epidermal tissue. *Soil Sci. Pl. Nutr.* 8:1-5.
- Yoshida, S., S.A. Navasero och E.A. Ramirez. 1969. Effects of silica and nitrogen supply on some leaf characters of the rice plant. *Plant Soil.* 31:48-56.
- Zeid, F.A. och H. Kuhn. 1971. Der Einfluss der Kieselsäure auf die Halmstabilität von Getreide. *Landwirt. Forsch. Sonderheft.* 26:105-112.

YTTERLIGARE REFERENSER

Följande litteratur ger en komplett översikt av kiselns mineralogi, funktion och förekomst i marken och i biologiska system.

- Jones, L.H.P. och K.A. Handreck. 1967. Silica in soils, plants, and animals. Adv. Agron. 19:107-149.
- McKeague, J.A. och M.G. Cline. 1963. Silica in soils. Adv. Agron. 15:339-396.
- Mitchell, R.S. 1975. Oxides and hydrous oxides of silicon. s.395-432. In J.E. Giseking (ed.) Soil Components Vol 2, Inorganic Compounds. Springer Verlag, New York.
- Simpson, T.L. och B.E. Volcani. 1981. Silicon and Siliceous Structures in Biological systems. Springer Verlag, Berlin.
- Wilding, L.P., N.E. Smeck och L.R. Drees. 1977. Silica in soils. s.471-552. In J.B. Dixon och S.B. Weed (ed.) Minerals in Soil Environments. Soil Sci. Soc. Am. Madison, Wisconsin.
- Werner, D. och R. Roth. 1983. Silica metabolism. s.682-694. In A. Pirson och M.H. Zimmerman (ed.) Encyclopedia of Plant Physiology. New Series Vol 15 B. Springer Verlag, Berlin.

