

Silicium beskytter afgrøder mod insekt- og svampeangreb

Silicium er teoretisk meget interessant for dyrkning af økologiske afgrøder, da det beskytter imod nogle af de sygdomme og stressfaktorer, som ikke kan bekæmpes ved økologisk dyrkning.

Af Morten Winther Vestenaa, Jonas Holm Rasmussen

Siliciumgødskning er særligt relevant for økologisk planteavl, som ikke må anvende pesticider som bekæmpelse mod plantesygdomme og insektangreb. I den videnskabelige litteratur findes en overvældende mængde beviser for, at silicium har positive effekter på flere alvorlige plantesygdomme og stresspåvirkninger.

Biokemisk har silicium ikke en direkte rolle i afgrøder, som vi kender det fra f.eks fosfor, som indgår i arvemateriale og er essentielt for energioverførselsprocesser. Derimod er siliciums funktion blandt andet at være et fysisk værn mod stress, som planteædende insekter og indtrængning af svampehyfer.

Potentialet i silicium er særligt stort for kornafgrøderne, da de er silicium akkumulatorer, men der er også potentielle for vigtige økologiske afgrøder som kartofler, tomater og løg. Det er dog usikkert om gødskning med silicium af afgrøder på danske jorde vil have en effekt, da der ikke er lavet de relevante studier. Desuden bør de danske jorde i teorien stille mere silicium til rådighed end de jorde i det globale syd, hvor der er fundet positive effekter af siliciumgødskning. Det er dog usikkert om det er tilfældet, og der er udvikling i viden om siliciumtilgængeligheden i jord, som peger på at silicium gødskning kan være relevant også under danske forhold.

Viden om silicium som plantenæringsstof er begrænset

Silicium har ikke fået meget opmærksomhed som et plantenæringsstof for afgrøder i tempererede klimaer som det danske. Grundstoffet har også været uden for det gode agronomiske selskab da det ikke er en del af gruppen af essentielle næringsstoffer. Det betyder både at det ikke har været indeholdt i lovgivning som gødningsstof, og at det har manglet interesse fra de agronomer som rådgiver og udvikler viden og produkter til landbruget (Brown et al., 2021).

Plantenæringsstoffer er i de seneste år begyndt at blive klassificeret efter deres agronomiske relevans, indenfor den del af plantevidenskaben, som omhandler næringsstoffer. I den forbindelse er silicium kommet ind i det gode selskab, da det har flere positive effekter især på græsser, som udgør hoveddelen af de dyrkede afgrøder.

Uvist om godt skning med silicium gavner afgrøder i Danmark

Data som anviser grænseværdier for, hvornår Si bliver udbyttebegrænsende, findes endnu ikke for alle afgrøder. Det klassiske og omfattende opslagsværk med udbyttekritiske koncentrationer for næringsstoffer i flere vævstyper og udviklingsstadier af Reuter og Robinson (1997) medtager heller ikke Si.

I andre dele af verden gødskes afgrøder rutinemæssigt med silicium, og godt skning med silicium er særligt udbredt i dyrkning af ris og soja. De fleste eksempler i litteraturen på kritiske grænseværdier findes da også for ris, som aktivt akkumulerer silicium til koncentrationer op mod 10% i tørstof. Flere uafhængige studier påpeger en kritisk nedre værdi i ris på omkring ~30 g/kg TS, dvs. 3% indhold i biomassens tørstof. Kritiske grænseværdier for Si i øvrige afgrøder er ikke fastsatte men vil være meget afgrødespecifikke (Tubaña & Heckman, 2015).

Tilgængeligheden af silicium i danske jorde er endnu ukendt, og det samme gælder grænseværdier for silicium i udbredte afgrøder som byg, hvede og havre. Det er derfor svært at vurdere med stor sikkerhed om godt skning med silicium vil gavne afgrødeproduktionen i Danmark.

Jordens evne til at frigive tilstrækkelige store mængder silicium i vækstsæsonen er det centrale spørgsmål i forhold til, om det er relevant at gødske med silicium på danske jorde. Danske jorde er i geologisk forstand unge, og generelt har geologisk ældre jorde haft en længere periode med kemisk og fysisk forvitring af de primære silikatmineraler. På ældre jorde i det globale syd findes derfor ofte positive udbytteresponser ved siliciumgødskning. Under forvitringen friges monosiliciumsyre (Si(OH)_4), som enten former sekundære lermineraler med jern, aluminium og magnesium eller udvasker. Dog kan andre jorde, også danske, bestå af store mængder af rene kvarts-sand silikater (SiO_2), men have meget lidt biotilgængeligt silicium, grundet den krystallinske bindingsform.

Udgangspunktet for plantetilgængeligt silicium i jorde er dermed forskelligt af jordens alder og sammensætning. Selvom der er meget silicium i sandede jorde formodes det, at den forvitring af jordens primære silikater, som finder sted indenfor en agronomisk tidshorisont på måneder, år eller årtier, er meget begrænset. Det kan derfor ikke forventes at være en markant kilde til planternes siliciumforsyning.

Amorfe silikater antages at have stor betydning for planternes siliciumforsyning. Som navnet antyder varierer den eksakte form, men grundlæggende er det opbygget af $\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ polymerer. Denne form er mere reaktivt, og kan dermed øge indholdet af plante-tilgængeligt monosiliciumsyre i jordvæsken.

Puljen af amorf silikater er høj i skove og permanente græssystemer, men falder over tid på jorde i dyrkede jorde. På grund af en i denne kontekst lang dyrkningshistorik på mange danske jorde, er der derfor risiko for, at der findes jorde i Danmark med dårlig evne til at stille Si fra den amorf pulje til rådighed. Det er dog ikke undersøgt.

Silicium fungerer som en rustning, der beskytter imod svampeinfektion

Flere afgrøder opkoncentrerer og aflejre silicium strategisk. Et godt eksempel er koncentration af silicium i torne, som det ses på figur 1. Bladspidsen på mikroskopibilledet har været igennem en analyse som fremhæver silicium med blåt flourescence, og det ses tydeligt at Si ophober sig i tornene på bladet. Udover ophobning i torne deponerer silicium sig i rødders endodermis, i cellevægge og i flere andre vævstyper.

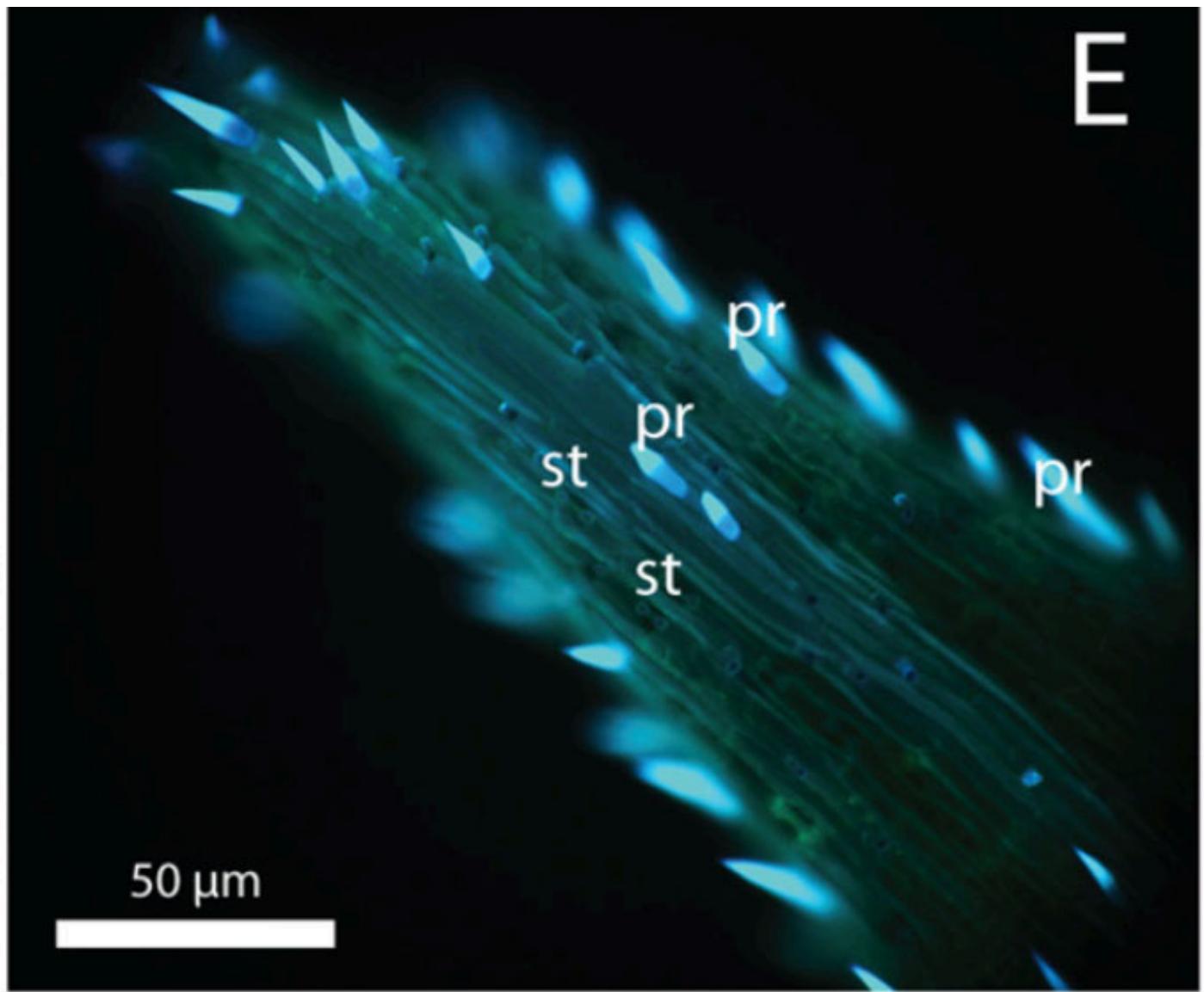


Foto: Kumar et al. 2017

Figur 1: Fluorescence mikroskopibillede af græsbladspids. Si lyser blåt ved alkali-induceret fluorescence.

Forkortelser: pr, prickle cell (dansk:torn), st, stroma. Modereret efter Kumar et al. (2017).

Når silicium indlejres i blade og stængler, danner det et forstærket væv, som også kaldes 'silicium-cellulose'. Det væv dannes også i cellevæggene omkring blades yderste cellelag. Billedligt danner Si en rustning for planten, som hæmmer risikoen for indtrængning af udefra kommende skadegørere såsom svampesporer (Debona et al 2017).

Man kan inddеле beskyttelsesgraden af silicium mod svampeinfektion i tre niveauer:

Niveau 1) Svampens infektion hæmmes idet svampens appresorium ikke kan penetrere den forstærkede siliciumcellevæg. Dermed undgås, at svampens hyfer trænger ind i plantens celler og danner infektion.

Niveau 2) Plantens siliciumforstærkning af cellevæggen er mere uensartet end ved niveau A og ikke tæt. Forstærkningen forsinkes, men forhindrer ikke infektionsprocessen. Dog medfører forsinkelsen, at der senere opstår synlige symptomer, samt at den latente periode, hvor svamphen danner nye sporer, er forsinket eller kortere. Det gør også, at plantens egne forsvarsmekanismer hurtigere kan nedkæmpe svamphen, ved f.eks. at regulere dannelsen af lignin, phenoler, og forsvarsenzymer.

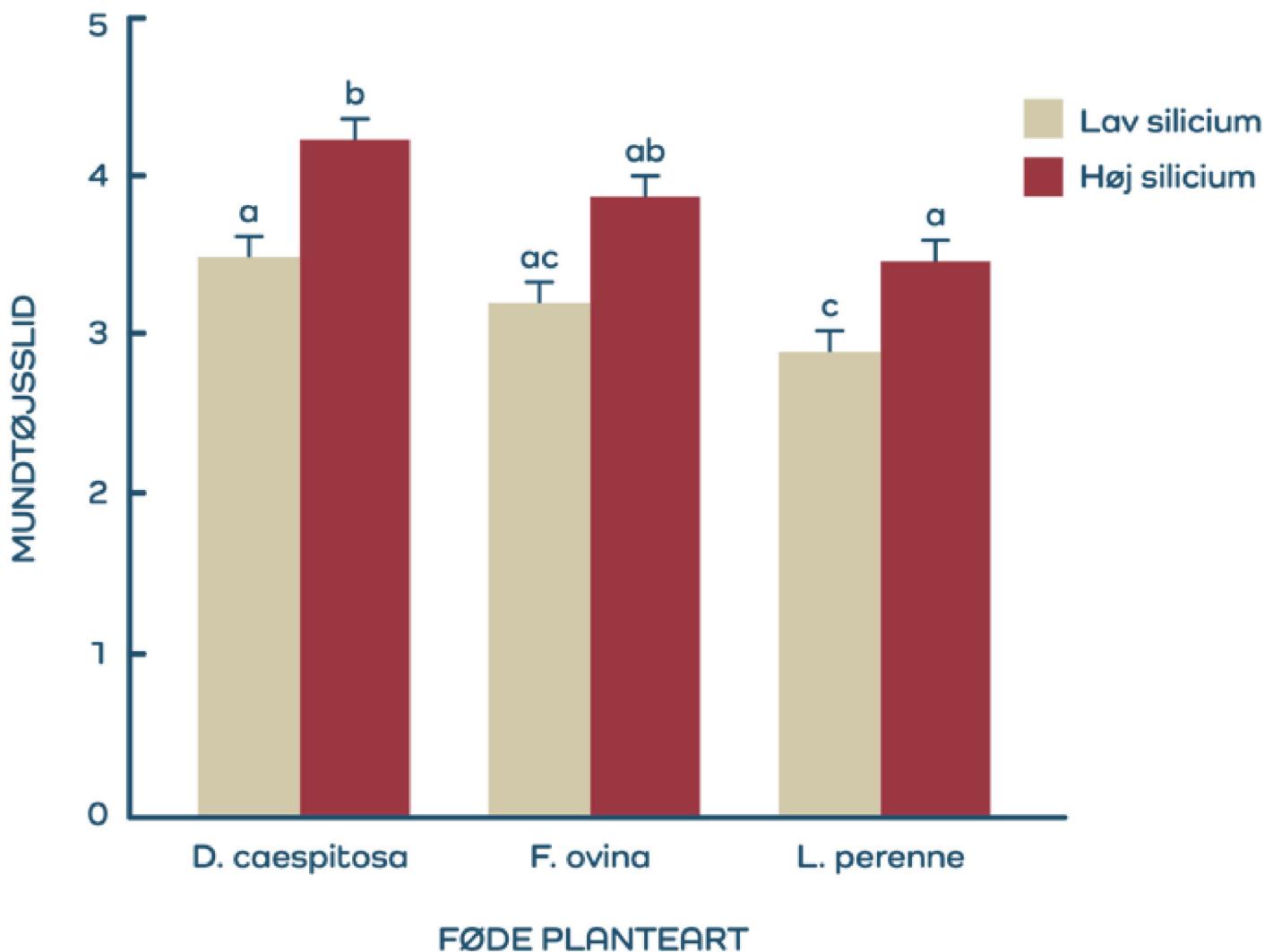
Niveau 3) Laget af indlejret silicium er yderligere reduceret, og svampens hyfe penetrerer planteceilen og forårsager infektion.

Silicium beskytter afgrøder imod insektangreb

Silicium yder også beskyttelse mod insektangreb ved mekanisk forstærkning af plantevæv. I tillegg til, at Si aflejres i forbindelser med cellevægge, aflejres Si også som små krystaller kaldet 'phytolitter' (phyto: plante, lithos: sten). Beskyttelsen mod insektangreb består primært i, at plantevævets øgede mekaniske styrke tærer på insekternes munddele.

Larvens munddele slides mere af at spise planter med højt siliciumindhold. På figur 2 ses, at det er uafhængigt af de tre testede plantearter. Dermed mindskes insekternes mulighed til at æde af afgrøderne og mængden af føde de indtager mindskes. Samtidigt nedsættes fordøjeligheden, så insekterne optager mindre kvælstof fra afgrøder, når der er mere silicium til stede. Som konsekvens nedsættes insekternes overlevelses- og reproduktionsevne.

Der findes et stort antal studier, der bekræfter den virkningsmekanisme, og et godt eksempel er Massey og Hartley (2008), som studerede slitagen på en plantespisende larves munddele på tre forskellige fødeplanter ved to forskellige Si niveauer (figur 3).



Figur 2: Slitage på munddele (gennemsnit \pm SE) (1/fortand:munddel længderatio) på *Spodoptera exempta* larver efter 12 dages diæt på *Deschampsia caespitosa*, *Festuca ovina* og *Lolium perenne*. Bogstaverne over søjlerne viser, hvor der er signifikant forskel imellem behandlinger (Turkey; $P<0.05$). Modereret efter Massey og Hartley (2008).

Indholdet af silicium i dyrkede planter varierer meget

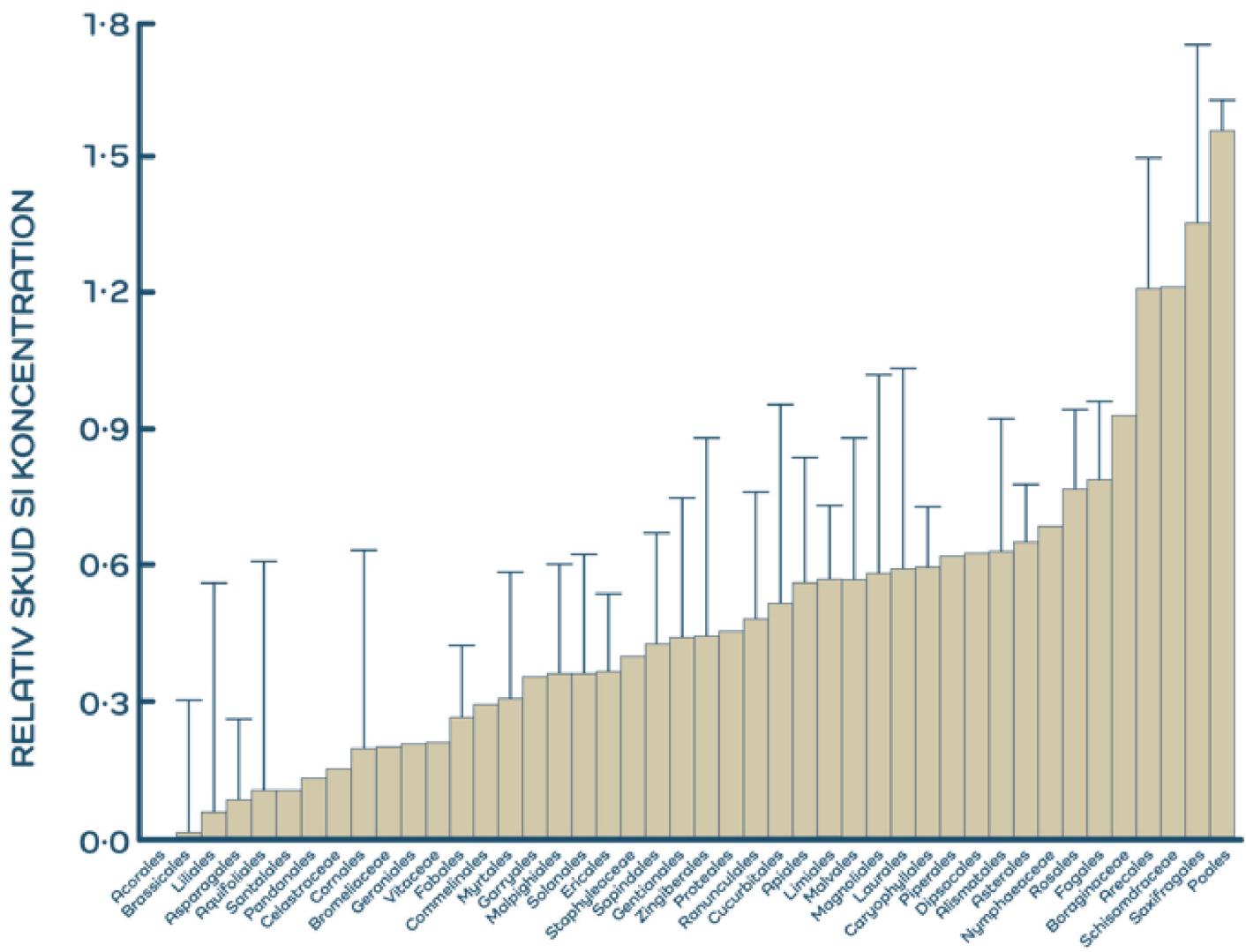
Monosiliciumsyre (Si(OH)_4), også kaldet orthosiliciumsyre, er den eneste plantetilgængelige form af silicium, og det optages via planters rødder som et neutralt molekyle. Optagelsesprocessen kan være aktiv, passiv eller rejktiv. På den baggrund kan planter inddeltes som Si-akkumulatorer, -intermediater eller -ekskluderende. En plante betegnes som Si-akkumulator ved koncentrationer over > 1% og som ekskluderende ved < 0,5% (Haynes 2014).

I de seneste årtier er der gjort store fremskridt i vores forståelse af de transportmekanismer, der afgør planters siliciumoptag. Særligt har Jang Feng Ma's forskningsgruppe identificeret flere siliciumtransportører i

rødder hvis tilstedeværelse og aktivitet bestemmer indholdet af silicium i skuddene af flere afgrøder (Huang & Ma, 2025).

Afgrøder, som i moderat eller høj grad optager silicium, opnår den største gavnlige effekt af en optimal siliciumforsyning. På figur 3 ses en oversigt over det relative indhold af silicium i taksonomiske ordener i gruppen af blomstrende planter. Figuren viser, at planter af græsordenen poales, og dermed kornafgrøderne, indeholder de højeste koncentrationer af silicium i gruppen af angiospermer. Det er derfor især afgrøder i græsfamilien, som har gavn af silicium, herunder kornarterne, men også afgrøder i græskarfamilien, f.eks. græskar, squash og agurk, kan have gavn af silicium (Hodson, 2005).

Afgrøder, som ikke aktivt optager silicium, kan dog også opnå gavnlige effekter. De indeholder blot en mindre andel silicium, og har derfor i mindre grad gavn af siliciums beskyttende effekter. Studier, i store afgrøder som tomater og kartofler, har påvist positive effekter, selvom de ikke optager store mængder. Der er også studier, der påviser en bedre efter-høst kvalitet i f.eks. løg og jordbær. Mekanismen menes også her at være mekanisk, da cellevæggen bliver forstærket af siliciumindholdet og dermed øger holdbarheden.



Figur 3: Gennemsnitlig (\pm SE) og relativ skud silicium koncentration af 44 ordner og ikke ordenstildelte familier af blomstrende planter. Data stammer fra 125 individuelle artikler i primær litteraturen. Modereret efter Hodson et al. (2005).

Referencer

- Brown, P. H., Zhao, F., & Dobermann, A. (2021). What is a plant nutrient? Changing definitions to advance science and innovation in plant nutrition. *Plant and Soil*, 476(1–2), 11–23. <https://doi.org/10.1007/s11104-021-05171-w> (<https://doi.org/10.1007/s11104-021-05171-w>)
- Debona, D., Rodrigues, F. A., & Datnoff, L. E. (2017). Silicon's role in abiotic and biotic plant stresses. *Annual Review of Phytopathology*, 55(1), 85–107. <https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-080516-035312> (<https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-080516-035312>)
- Hodson, M. J., White, P. J., Mead, A., & Broadley, M. R. (2005). Phylogenetic variation in the silicon composition of plants. *Annals of Botany*, 96(6), 1027–1046. <https://doi.org/10.1093/aob/mci255>

(<https://doi.org/10.1093/aob/mci255>)

Huang S, Ma JF. Silicon transport and its "homeostasis" in rice. Quant Plant Biol. 2025. doi: 10.1017/qpb.2024.19. PMID: 39810914; PMCID: PMC11729502.

Kumar, S., Soukup, M., & Elbaum, R. (2017). Silicification in Grasses: Variation between Different Cell Types. *Frontiers in Plant Science*, 8, 438. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00438>
(<https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00438>)

Massey, F. P., & Hartley, S. E. (2008). Physical defences wear you down: progressive and irreversible impacts of silica on insect herbivores. *Journal of Animal Ecology*, 78(1), 281–291. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2656.2008.01472.x> (<https://doi.org/10.1111/j.1365-2656.2008.01472.x>)

Reuter, D., & Robinson, J. (1997). Plant Analysis: an interpretation manual (2nd ed.). CSIRO Publishing.
<https://www.publishing.csiro.au/book/437/> (<https://www.publishing.csiro.au/book/437/>)

Tubaña, B.S. & Heckman, J.R. (2015). Chapter 2: Silicon in Soils and Plants in *Silicon and Plant Diseases* (F.A. Rodrigues, L.E. Datnoff (eds.). Springer International Publishing, Switzerland 2015.

STØTTET AF

Promilleafgiftsfonden for landbrug

Måske er du også interesseret i



07.11.2025

Struvit er et meget rent produkt og en sikker fosforgødning

Mængden af forurenende stoffer pr. kg næringsstof er lav sammenlignet med andre...



04.03.2025

Manganmangel - en skjult dræber i økologisk korn

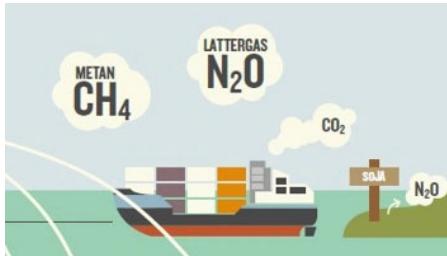
Manganmangel kan koste udbytte.



07.11.2025

Anvendelse af svovlgødninger til økologiske afgrøder

Få viden om svovl til økologiske marker fra resultater af forsøg med svovlgødning,...



08.01.2026

Landbrugets andel af Danmarks udledning af drivhusgasser

Ved den seneste opgørelse står landbruget for 28 pct. af Danmarks udledning og 37 p...

09.01.2026

Regler for gødning ved omlægning til økologi

Når en bedrift begynder omlægning til økologi, kommer der flere forskellige regelsæt f...

22.12.2025

Kvælstofværdi af gylle til vintersæd

Kvælstof har en væsentlig betydning for udbyttet, men et højere kvælstofniveau fører ik...



02.01.2026

Kvælstofværdi af gylle til vårsæd

Kvælstof har en klar betydning for udbyttet, men fokus bør være på det økonomiske og...

16.12.2025

Klimagødning: Vælg gødning med høj udnyttelse og lav udledning af lattergas

Med høje udbytter og lav lattergasudledning kan man opnå lave totale udledninger ...



07.11.2025

Anvendelse af svovlgødninger til økologiske afgrøder

Få viden om svovl til økologiske marker fra resultater af forsøg med svovlgødning,...



14.08.2025

Sverige: Biogas, separering og udlægning optimerer tildeling og udnyttelse af N og P

I Sverige er behovet for at kunne transportere fosfor fra områder med overskud til...



13.05.2025

Gødkning af kløvergræs til biogas

Kløvergræs til biogas er ikke kløvergræs til foder. Et optimalt kvælstofniveau er 50-75 kg N...



14.05.2025

Muligheder og barrierer for økologi i den grønne trepart

Økologi kan bidrage til løsninger på tværs af de udfordringer, som den grønne trepart skal...



07.11.2025

Struvit er et meget rent produkt og en sikker fosforgødning

Mængden af forurenende stoffer pr. kg næringsstof er lav sammenlignet med andre...



07.11.2025

Struvit - fra spildevand til ressource

Struvit udfældes fra spildevand, og har et fosforindhold, der gør det velegnet som startgødning...



07.11.2025

Potentiale for højere økologiske udbytter

Det er muligt at mindske gabet mellem økologiske og konventionelle udbytter med...

Kontakt



Morten Winther Vestenaa

Specialkonsulent

+45 23 47 33 92

mowv@icoel.dk