

Micronutriënten in de landbouw en beschikbaarheid in de bodem - Focus op koper en zink

D.W. Bussink

Nutriënten Management Instituut NMI, Wageningen

Inhoud

1. Introductie	99
2. Gewas- en dierbehoefte en overschotten in Nederland	101
2.1. Gewas- en dierbehoefte	101
2.2. Cu- en Zn-overschotten	101
3. Sporelementen in de bodem: factoren die van invloed zijn op beschikbaarheid	103
3.1. Vormen	103
3.2. Factoren die de beschikbaarheid beïnvloeden	104
3.3. De rol van de plant	105
4. Grondonderzoek als indicator voor de beschikbaarheid in de bodem	107
4.1. Bepaling van de beschikbaarheid met achtergronden	107
4.2. Ontwikkelingsperspectief en behoefte naar bepaling beschikbaarheid in grond	108
4.3. Gewasonderzoek in relatie tot grondonderzoek	109
4.4. Te nemen maatregelen	110
5. Samengevat	111
Literatuur	113

1. Introductie

Micronutriënten (spooorelementen) als B, Mo, Cu, Zn, Fe en Ni zijn essentieel voor een goede groei van gewassen en dieren. Gehalten in de bodem en daarmee in planten zijn van nature vaak te laag voor een optimale gewasgroei en/of dierprestatie. Wereldwijd komt een tekort aan Zn maar ook Cu dan ook vaak voor (Voortman, 2011). Bemesting is noodzakelijk om tekorten bij gewassen op te heffen. Resultaten uit Turkije laten zien dat dit kan leiden tot spectaculaire opbrengststijgingen (tot wel 600%) in Zn-deficiënte gebieden (Cakmak et al., 1996). Dit heeft daar geleid tot een sterk stijgend gebruik van Zn-houdende meststoffen. Anderzijds wordt in India verwacht dat de problematiek met betrekking tot Zn-tekorten verscherpt (Singh, 2011).

Tegelijkertijd is het van belang om efficiënt met micronutriënten om te gaan, omdat deze schaars en relatief duur zijn en nog duurder zullen worden. De wereldvoorraden van bijvoorbeeld winbaar koper en zink zijn zeer beperkt (Bastein, 2011). Anderzijds kan overmatig gebruik leiden tot milieuproblemen. In Nederland wordt vooral op de veehouderijbedrijven van de zware metalen Cu en Zn meer aangevoerd dan dat er met het gewas wordt afgevoerd. Dit leidt tot ophoping en/of extra uit- en afspoeling naar het oppervlaktewater.

Om efficiënt met spooorelementen om te kunnen gaan dient enerzijds bekend te zijn welke factoren de beschikbaarheid van spooorelementen in de bodem beïnvloeden en anderzijds dient bekend te zijn wat de gewas- en dierbehoefte is. In deze bijdrage wordt vooral ingegaan op bodemprocessen en de rol van grondonderzoek om de beschikbaarheid van spooorelementen voor gewassen te duiden.

2. Gewas- en dierbehoefte en overschotten in Nederland

2.1. Gewas- en dierbehoefte

Gewassen verschillen in hun behoefte aan Cu en Zn. In Tabel 4 is voor een aantal gewassen weergegeven of ze een hoge of lage gewasbehoefte aan deze elementen hebben en op welke processen in de plant Cu en Zn invloed hebben. In Nederland is de voorziening van gewassen met Cu en Zn in het algemeen goed door het gebruik van dierlijke mest dat relatief hoge gehalten aan Cu en Zn bevat.

Cu en Zn zijn essentieel voor een goede diergezondheid en dierprestatie (Tabel 4). De behoefte van dieren aan Cu en Zn hangt af van de diersoort, leeftijd en productiedoel. In Tabel 2 is globaal weergegeven welke ranges in behoefte-normen van ruwvoer gehanteerd worden voor melkvee en varkens (EU 2003a; EU2003b, COMV, 2005; Jacela et al., 2010). Met bemesting kunnen deze gehalten in gewassen voor ruwvoer in principe ongeveer gerealiseerd worden, maar in de praktijk is de opname meestal lager (zie Tabel 1), terwijl gehalten van boven de 10 mg Cu per kg ds voer via bemesting niet te realiseren zijn. Veelal wordt daarom extra Cu en Zn toegevoegd aan krachtvoerders en worden er mineraalconcentraten toegevoegd aan ruwvoer, te meer daar voldoende Cu en Zn verondersteld wordt positief te werken op de diergezondheid en het weerstandsvermogen.

Tabel 1. Het gemiddelde Cu- en Zn-gehalte en de 95% range van enkele belangrijke ruwvoerders.

Ruwvoeder	Cu-gehalte (95%-range)	Zn-gehalte (95%-range)
Weidegras	9 (5 - 13)*	..
kuilgras	8 (5 -11,5	..
snijmaiskuil	4 (2 – 6)	35 (20-50)

Tabel 2. De behoefte aan Cu en Zn uitdrukt in mg per kg droog voer.

Diersoort	Cu	Zn
Melkvee*	8-12	25-50
Varkens	5-10	50-125

* In Nederland worden voor droogstaand melkvee en jongvee beduidend hogere normen aangehouden

2.2. Cu- en Zn-overschotten

Uit een inventarisatie van Den Boer et al. (2007) op 25 melkveehouderijbedrijven in Drenthe bleek dat de Cu- en Zn-voorziening regelmatig het dubbele of meer bedroeg van wat vanuit veevoedingstechnisch oogpunt nodig is. Dit resulteerde gemiddeld over de bedrijven in positieve Cu- en Zn-balans van respectievelijk 184g Cu/ha en 304 g Zn/ha. Bovendien was de variatie tussen bedrijven zeer groot. Indien op de bedrijven Cu-houdende voetbaden werden gebruikt kon het Cu-overschot oplopen tot 1 kg/ha. Op nationaal niveau is het Cu en Zn in mengvoerders de belangrijkste bron van toevoer (via dierlijke mest) naar landbouwpercelen (Jongbloed en Römken, 2009) en bedroeg voor Nederland als geheel het overschot respectievelijk ongeveer 400 en 1100 ton Cu en Zn per jaar.

Door een aangepast management en aanpassingen in de minerale samenstelling van voedermiddelen zijn Cu- en Zn-overschotten drastisch te verkleinen (Den Boer et al., 2007;

Vliet et al., 2009), mits erfbetreiders hun adviezen naar de agrarisch ondernemer met betrekking tot de spoorelement voorziening op elkaar afstemmen. Naar verwachting zal dit leiden tot lagere gehalten in de mest. In combinatie met een lagere mestgift per ha als gevolg van het vigerende N- en P-beleid zal de aanvoer naar landbouwpercelen naar verwachting voldoende afnemen. Voor een adequate voorziening van gewassen met Cu en Zn wordt het dan belangrijker om via grondonderzoek te kunnen voorspellen hoeveel Cu en Zn beschikbaar kan komen door nalevering uit de bodem en welke factoren hierop van invloed zijn. Dan kan beter onderkend worden of er bemesting nodig is en zo ja, welk type meststof of welke toedieningstechniek het beste gebruikt kan worden Dit is des te belangrijker voor gebieden waarbij de voorziening met Cu en Zn marginaal (zoals in de tropen, Zuidoost Azië) is.

3. Spoorelementen in de bodem: factoren die van invloed zijn op beschikbaarheid

3.1. Vormen

Spoorelementen zijn in verschillende vormen in de bodem aanwezig, zowel in de vaste als in de opgeloste fase. De vier belangrijkste vormen zijn:

- als vrij anion/kation in de bodemoplossing;
- gecomplexeerd met anorganische/organische bestanddelen in de bodemoplossing; en
- geadsorbeerd aan metaal(hydr)oxiden, organische stof en/of kleimineralen; en
- in bodemmineralen

Er is een groot verschil tussen de totaalgehalten aan (spoor)elementen in de bodem (Tabel 3) en de concentratie in de bodemoplossing.

Tabel 3. Totaalgehalten aan Cu en Zn die wereldwijd in de bodem worden aangetroffen en de concentratie ervan in de bodemoplossing, uitgedrukt als totaalconcentratie in de bodemoplossing. Data uit Mengel & Kirkby (1987) en Kabata-Pendias & Pendias (2001).

Element	totaalgehalte, mg kg ⁻¹	concentratie in bodemoplossing, mg kg ⁻¹
Koper	1 – 140	0,0018 – 0,135
Zink	3,5 – 770	0,021 – 0,570

Over het algemeen komt een groot deel van de voorraad aan Cu en Zn voor in mineralen in de bodem, waaruit deze vrij kunnen komen door verwerking. Doorgaans is dit een zeer langzaam proces en zal zeer weinig bijdragen aan de beschikbaarheid van het spoorelement voor een gewas binnen een groeiseizoen.

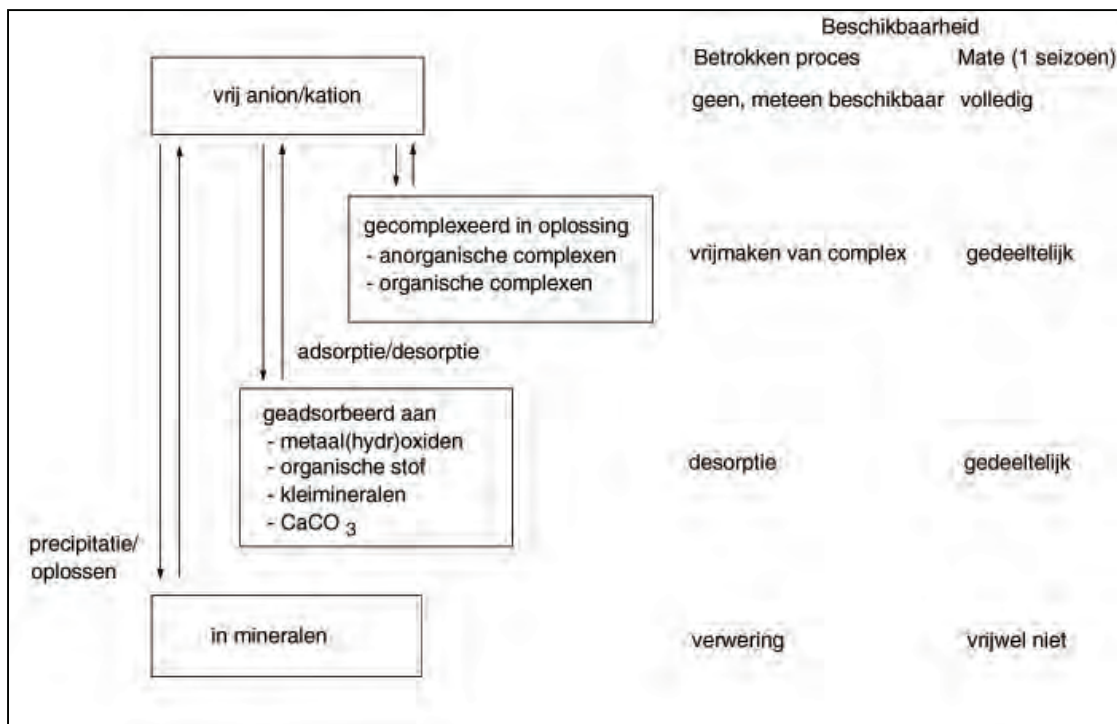
Voor spoorelementen geldt dat alleen de vrije vorm in oplossing (het Cu²⁺, Zn²⁺ ion), opneembaar is voor de plant en dus chemisch gezien beschikbaar is. Dit is slechts een fractie van het totaal (Tabel 3).

Tussen de concentratie van het vrije ion in oplossing en de andere vormen van het element in de bodem bestaat een chemisch evenwicht. De ligging van dat evenwicht wordt bepaald door de affiniteit van de chemische reacties. Een daling van de concentratie van het vrije element in oplossing leidt tot een verschuiving van het evenwicht, waardoor een deel van het spoorelement vanuit de gecomplexeerde of geadsorbeerde fase wordt vrijgemaakt en in oplossing komt. Deze nalevering buffert de concentratie van het vrije spoorelement in oplossing zoals schematisch is weergegeven in Figuur 1.

Complexering in oplossing met anorganische/organische complexvormers speelt een rol bij Cu en Zn en wordt beïnvloed door de pH. Anorganische complexvormers zijn onder andere chloride (Cu en Zn), sulfaat (Zn) en carbonaat (Zn). Daarnaast kunnen Cu en Zn in oplossing gecomplexeerd zijn met opgeloste organische stof (Ashley, 1996). Gecomplexeerd Cu en Zn is niet direct beschikbaar voor opname. Het moet eerst worden vrijgemaakt van het complex.

Wel verhoogt complexering de mobiliteit van Cu en Zn in de bodemoplossing, waardoor de gewasopname kan toenemen.

Het adsorptiecomplex is de belangrijkste micronutriënten-buffer in de bodem en daarmee de belangrijkste bron van opname door de plant. Geadsorbeerd aan bodembestanddelen (klei, organische stof, metaal(hydr)oxiden, kalk) moeten Cu en Zn eerst worden gedesorbeerd alvorens ze opneembaar zijn voor de plant. Wanneer de adsorptie toeneemt, is de evenwichtsconcentratie van het sporelement in oplossing lager en is het sporelement dus minder beschikbaar voor opname. Heel weinig organische stof en kleimineralen is ongunstig, want dan spoelen nutriënten snel uit; een heel hoog gehalte aan klei, ijzeroxiden en organische stof is ook weer niet gunstig, want dan neemt de beschikbaarheid van de nutriënten relatief weer af, omdat zoveel geadsorbeerd wordt.



Figuur 1. Schema van de belangrijkste bodemfracties waarin hoofd- en sporelementen aanwezig zijn. De processen die van invloed zijn op het beschikbaar komen van een bepaalde fractie en de mate waarin de verschillende fracties kunnen vrijkomen voor opname binnen een groeiseizoen zijn aangegeven.

3.2. Factoren die de beschikbaarheid beïnvloeden

De factoren die de adsorptie en resorptie bepalen, en daarmee de mate waarin Cu en Zn beschikbaar zijn, zijn onder andere:

- pH;
- vochtgehalte;
- temperatuur; en
- interacties met andere elementen.

Adsorptie/desorptieprocessen zijn sterk pH-afhankelijk. Bij adsorptie aan metaal(hydr)oxiden en kleimineralen leidt een verhoging van de pH tot een hogere adsorptie van Cu en Zn,

waardoor de beschikbaarheid afneemt. De Cu en Zn-concentratie in de bodemoplossing nemen in 100-voud af per eenheid dat de pH toeneemt. Hierdoor neemt ook de opname van Cu en Zn door de plant sterk af bij verhoging van de pH. Op kalkgronden zonder bemesting zal daardoor vaak een Zn tekort optreden.

Het vochtgehalte van de bodem dient voldoende te zijn voor nutriëntentransport. Met de aanvoer van water naar de wortels worden immers ook spoorelementen, die zich in de bodemoplossing bevinden, meegevoerd. Onder droge omstandigheden zijn nutriëntengehalten in gewassen dan meestal ook duidelijk lager. Een goede vochtvoorziening kan ertoe leiden dat bij een relatief lage beschikbaarheid toch voldoende Cu en Zn wordt opgenomen.

Voor de meeste elementen geldt dat afname van de temperatuur leidt tot afname van de opname van nutriënten.

Wat de interactie met andere elementen betreft wordt de opname van Cu sterk beperkt door andere divalente kationen, vooral Zn^{2+} . Een overmaat Zn kan leiden tot een Cu-tekort. Cu en N vertonen sterke positieve interacties. Meer N verhoogt de opname van Cu en dat geldt ook omgekeerd. Toediening van relatief grote hoeveelheden N- en P-meststoffen kunnen door stimulering van de groei leiden tot Cu-gebrek bij planten die in gronden groeien met lage Cu-gehalten. Cu en P zijn antagonisten. Verhoging van de hoeveelheid P in de bodem leidt door competitie om adsorptieplekken op de organische stof, tot vermindering van de hoeveelheid geadsorbeerd Cu in de bodem. Op korte termijn leidt dit tot toename van beschikbaarheid van Cu. Op lange termijn leidt dit echter, door afname van de geadsorbeerde Cu-ionen die een soort voorraad vormen, tot Cu-gebrek. Anderzijds zijn planten met P-gebrek vatbaar voor Cu-toxiciteit. Cu-toxiciteit kan leiden tot Fe-gebrek in planten: Cu en Fe zijn antagonisten.

Zn vertoont interacties met vele elementen: Zn-P, Zn-N, Zn-K, Zn-Mn, Zn-Fe en Zn-Cu (Moraghan & Mascagni, 1991). De interactie met P is bekend. Hoge P-giften kunnen leiden tot het ontstaan van Zn-tekort en daardoor tot een opbrengstderving i.p.v. een opbrengststijging. Doordat meer P wordt opgenomen versnelt de groei van de spruit en dit leidt tot 'verdunning' van de Zn-concentratie in het gewas en daardoor tot Zn-gebrek. Daarnaast neemt de Zn-oplosbaarheid in de bodem af bij verhoging van P-concentraties in bodemoplossing. Gewassen met tekort aan Zn kunnen hoge P-gehalten hebben. Het komt voor dat ogenschijnlijke Zn-gebreksverschijnselen, in werkelijkheid P-toxiciteitsverschijnselen zijn.

3.3. De rol van de plant

Niet alleen de zojuist genoemde factoren beïnvloeden de beschikbaarheid van spoorelementen voor de planten, maar planten kunnen zelf ook een actieve rol spelen in de opname. Plantenwortels kunnen de chemische omstandigheden in de nabijheid van de wortel (rhizosfeer) sterk beïnvloeden door een verandering in de pH. Deze verandering van pH hangt samen met het opnamemechanisme van kationen en anionen. Opname van kationen is gekoppeld aan afgifte van H^+ en opname van anionen aan een netto afgifte van OH^- . Wanneer de opnamebalans van (kationen-anionen) negatief is (d.w.z. wanneer netto meer anionen worden opgenomen), wat doorgaans het geval is wanneer N als nitraat wordt opgenomen, stijgt de pH in de rhizosfeer. Als N overwegend wordt opgenomen als ammonium, of bij planten met symbiotische stikstofbinding, is de opnamebalans van (kationen-anionen) positief en daalt de pH in de rhizosfeer (Aquilar & Van Diest, 1981;

Gahoonia et al., 1992; Thomson et al., 1993). Door een verandering van de pH in de rhizosfeer verandert ook de beschikbaarheid van spoorelementen. Bijvoorbeeld een pH-stijging in de rhizosfeer zorgt voor een verminderde beschikbaarheid van Cu en Zn. Dit betekent dus dat de vorm waarin N wordt opgenomen een belangrijke rol speelt bij de opname van mineralen.

Plantenwortels scheiden diverse organische verbindingen uit, bijvoorbeeld suikers, enzymen, organische zuren, en in bijzondere gevallen phytosideroforen: stoffen die zorgen dat bepaalde elementen gemakkelijker opgenomen kunnen worden. De uitscheiding van organische zuren uit de wortels van sommige plantensoorten kan sterk toenemen door fosfaatgebrek, waardoor meer P kan worden opgenomen. De capaciteit van wortels om phytosideroforen uit te scheiden verschilt sterk tussen plantensoorten en tussen rassen van een soort (Römheld & Marschner, 1990; Marschner, 1995).

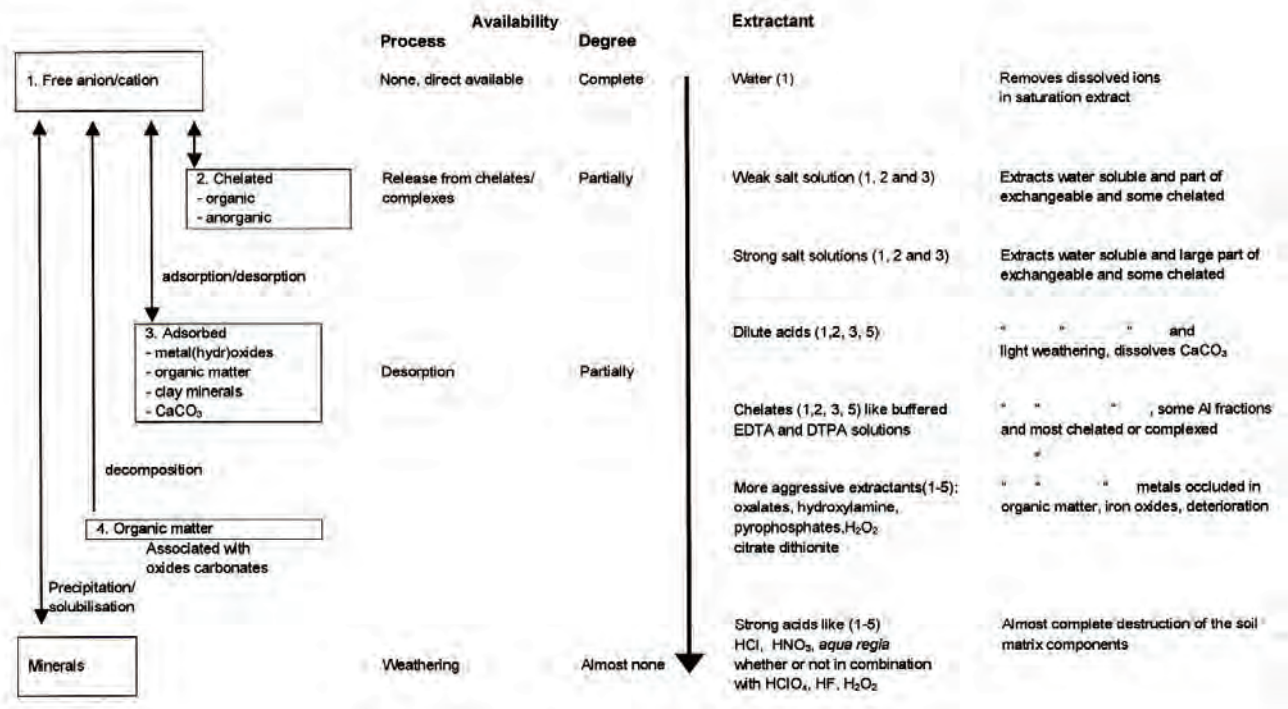
In Tabel 4 zijn enkele van invloed zijnde factoren op de beschikbaarheid in beknopte vorm weergegeven.

4. Grondonderzoek als indicator voor de beschikbaarheid in de bodem

4.1. Bepaling van de beschikbaarheid met achtergronden

De ontwikkeling van grondonderzoeksmethodieken kwam in de twintiger jaren van de vorige eeuw op gang en werd sterk geïntensiveerd na 1945. De ontwikkelde technieken zijn vooral gebaseerd op “trial and error” onderzoek (Van Erp en Van Beusichem, 1998). Diverse extractiemiddelen zijn in het verleden getest om vast te stellen of ze agressief genoeg waren om met de toen beschikbare analytische technieken verschillen in extraheerbaar nutriëntgehalte tussen gronden vast te stellen. Deze verschillen zijn vervolgens gerelateerd aan opbrengst- en respons proeven op bemesting. Deze correlatieve benadering heeft ertoe geleid dat elk land en/of regio zo’n beetje zijn eigen extractie methodiek heeft, hetgeen resulteert in tientallen verschillende methodieken (Jones 1998, Bussink & Temminghoff 2004) met hun eigen waarderingssystematiek. Dit bemoeilijkt het uitwisselen van bodemanalyse gegevens en bijbehorende adviezen tussen regio’s.

In Nederland werd tot voor kort 0,43 M salpeterzuur en 0,4 M azijnzuur als extractiemiddel gebruikt om respectievelijk Cu en Zn te bepalen. De destijds afgeleide relaties tussen de hoeveelheid geëxtraheerd en gewasrespons verklaren vaak niet meer 25%.



Figuur 2. Belangrijkste fracties van sporelementen in de bodem, processen van invloed op het beschikbaar komen van bepaalde fractie, mate waarin de verschillende fracties kunnen vrijkomen voor opname binnen een groeiseizoen en type extractiemiddel dat van invloed is op het vrij maken van micronutriënten uit een bepaalde fractie. Het is slechts een grove indicatie van wat de belangrijkste fracties zijn die micronutriënten vrij maken voor de bodemplossing (Bussink & Temminghoff, 2004).

Met de komst van nieuwe analysetechnieken in de afgelopen decennia (ICP, ICP-MS) kunnen tot meer dan 1000 keer lagere gehalten worden gemeten (Bussink & Temminghoff, 2004). Dat biedt de mogelijkheid om met zwakkere extractiemiddelen te gaan werken die beter het wortelmilieu weerspiegelen.

In zijn algemeenheid dient een goed extractiemiddel informatie te geven over:

- de hoeveelheid die direct beschikbaar is in de bodem (intensiteit); en
- de hoeveelheid die gemakkelijk in oplossing kan komen om de door de plant opgenomen hoeveelheid te vervangen (capaciteit of hoeveelheid).

Voor een optimale gewasgroei c.q. het realiseren van een bepaald gewenst gehalte in het gewas, dienen de nutriëntconcentraties in de bodemoplossing boven een bepaalde waarde te blijven. Een groeiend gewas zal eerst de direct beschikbare hoeveelheid opnemen. Het gehalte in de bodemoplossing zal daardoor dalen. Vervolgens bepaalt de hoeveelheid die gemakkelijk in oplossing kan gaan of een zekere minimumconcentratie in de bodemoplossing gehandhaafd kan blijven om zo optimale gewasgroei of een gewenst gehalte in het gewas te realiseren. Bemesting is nodig indien dit niet het geval is. Dit concept is uitstekend beschreven door Mengel & Kirkby (1987). Echter wanneer er maar één extract wordt gebruikt per element is het minder goed mogelijk om onderscheid te maken tussen intensiteit en capaciteit. Het resultaat kan zijn dat de correlatie coëfficiënt tussen gewasrespons en grondanalyseresultaat relatief laag is. Twee typen extractie, één voor intensiteit en één voor capaciteit is in principe een betere benadering maar duurder en daardoor nu niet gebruikelijk.

4.2. Ontwikkelingsperspectief en behoefte naar bepaling beschikbaarheid in grond

De afgelopen decennia is detectielimiet voor het meten van sporelementen enorm omlaag gegaan (Bussink & Temminghoff, 2004). Daardoor kan van diverse agressieve extractiemiddelen geswicht worden naar één zwak extractant (bijvoorbeeld met 0,01 M CaCl_2). Deze weerspiegelt beter wat er werkelijk beschikbaar is (de intensiteitsbepaling). Bovendien maakt dit het mogelijk om recht te doen aan het feit dat de gewasrespons voor een element niet alleen afhankelijk is van het betreffende element, maar ook van de overige elementen in de bodemoplossing en de vaste fase van de bodem (klei, zand, oxiden en organische stof) die bijvoorbeeld bepaald kan worden met spectroscopische technieken (zie verderop). Zogenaamde multi-nutriënt gebaseerde bemestingsadviezen (het advies voor bijv. Cu is niet alleen afhankelijk van de Cu-toestand, maar ook van de Zn- en P-toestand) worden daarmee in principe mogelijk. De beoordeling van sporelement beschikbaarheid voor het gewas kan daarmee belangrijk worden verbeterd. Bijkomend voordeel is dat voor veel sporelementen minder gewasonderzoek nodig is om vast te stellen of sporelement niveaus adequaat, te laag of te hoog zijn. Immers er kan beter worden voorspeld welk gehalte aan sporelementen in het gewas te verwachten is.

In het fysisch-chemisch grondonderzoek zijn de afgelopen decennia nieuwe inzichten ontstaan in het begrijpen van bodemchemische processen en hoe deze processen ingrijpen op de beschikbaarheid van (spoor)elementen. Dit betekent het met behulp van modellen toepassen van kennis over de nalevercapaciteit van de vaste fase (ad- en desorptiegedrag van klei, oxiden en organische stof en het complexatiegedrag van in de bodemoplossing aanwezige (an)organische liganden), in de evaluatie van het grondanalyse resultaat. Uit werk van Wageningen Universiteit blijkt dat het gedrag van diverse zware metalen (waaronder Cu

en Zn) inmiddels goed te beschrijven is. Temminghoff et al. (1998) kon voor Cu een directe relatie ontwikkelen tussen het extractie resultaat met 0.01 M CaCl₂ en het adsorptie/desorptie gedrag van de vaste fase. Bovendien gaf dit een beter verband met de opname door gras dan extractie met 0,43 M HNO₃ extractie. McLaren et al. (1987) vond een goede relatie tussen 0,01 M CaCl₂ extractie en gewasopname voor Co, in het bijzonder wanneer rekening wordt gehouden met de pH.

Het bovenstaande betekent dat indien de samenstelling van de vaste fase bekend is en de concentratie aan (spoor)elementen met een zwak extractant is bepaald, dat het dan mogelijk is om de beschikbaarheid van een sporelement voor gewasopname nauwkeuriger en op meer fundamentele grondslag te voorspellen. Bijkomend voordeel is dat in principe ook aangegeven kan worden in welke vorm een nutriënt het beste toegediend kan worden, hoe het ruimtelijk verdeeld dient te worden (bijvoorbeeld breedwerpig toedienen versus plaatsing) en of bemesting van de bodem wel de beste strategie is of dat tijdig met bladbemesting dient te worden begonnen.

Het vaststellen van de compositie van de vaste fase kan relatief duur zijn, maar is slechts iedere 5-10 jaar nodig. Bovendien zijn goedkope technieken in opkomst. Niet invasieve technieken zoals nabij infrarood spectroscopie (NIR) of mid infrarood spectroscopie (MIR) hebben een groot potentieel. Chang et al. (2001) heeft 33 chemische, fysische en biologische parameters van 802 grondmonsters getest afkomstig uit 4 gebieden van de VS. Zij lieten zien dat totaal C, totaal N, CEC (kationenuitwisselingscapaciteit), zand en silt hoeveelheid relatief nauwkeurig voorspeld konden worden. Recentelijk bevestigde Brown et al. (2006) deze bevindingen. In Nederland heeft Blgg AgroXpertus enkele jaren geleden nabij infrarood spectroscopie (NIR) recentelijk voor grondonderzoek geïntroduceerd. In Australië wordt MIR al langer toegepast in routinematig grondonderzoek. Daarbij worden onder andere klei, zand, silt, totaal C, CEC en de kationencompositie van de CEC gemeten.

Recentelijk is een onderzoek gestart om voortbouwend op basis van de zojuist genoemde kennis te komen tot een nieuwe waarderingssystematiek voor sporelementbeschikbaarheid in gronden. Deze is niet alleen in Nederland maar in principe ook internationaal inzetbaar. Ook voor ontwikkelingslanden lijkt dit de gewenste oplossingsrichting, daarbij gebruik makend van een zwak multinutriënt extractiemiddel en het vaststellen van de samenstelling van de vaste fase (spectroscopisch of via een agressieve extractie) met daaraan geadsorbeerde sporelementen.

4.3. Gewasonderzoek in relatie tot grondonderzoek

Een duidelijk gebrek aan sporelementen kan veelal visueel worden onderkend. Situaties met een beperkt tekort (tot 10%) zijn visueel vaak lastig te onderkennen. Gewasonderzoek kan dan uitkomst bieden en op basis daarvan kunnen er maatregelen worden genomen via bladbemesting om een tekort op te heffen. Echter een eventuele achterstand/opbrengstderving door een tekort kan niet meer ongedaan worden gemaakt. Ook is op basis van gewasonderzoek lastiger vast te stellen of het tekort van een bepaald nutriënt het gevolg is van tekort van dat nutriënt of het gevolg is van bijvoorbeeld een overaanbod van andere nutriënten (denk aan Zn- en P-interactie) of een te hoge pH. Meer informatie over gewasanalyse is te vinden in Reuter & Robinson (1986) en Bussink & Temminghoff (2004).

4.4. Te nemen maatregelen

Bij een tekort aan spoorelementen is niet alleen bemesting met spoorelementen nodig maar dient als eerste op basis van het grondonderzoek te worden nagegaan of bekalking nodig is om de pH op orde te brengen en om bijvoorbeeld vast te stellen of er een risico bestaat van P-geïnduceerd P-gebrek. Ook maatregelen die bijdragen aan een betere vochtvoorziening en doorwortelbaarheid van de bodem (een betere bodemstructuur) zijn van belang voor een goede nutriëntbenutting. Aansluitend dient de keus gemaakt te worden welke minerale meststof zinvol kan worden toegepast. Als Zn-meststoffen worden gebruikt, ZnO, ZnSO₄ en Zn-chelaten. Als Cu-meststoffen worden gebruikt, CuO, Cu₂O, CuSO₄ en Cu-chelaten. De werking is het hoogst bij de chelaten en het laagst bij de oxiden. Daartegenover staat dat chelaten het duurst zijn. Andere vormen komen ook voor. De eigenschappen van de grond (mate van vastlegging van) in combinatie met de kostprijs van de meststof bepalen welke meststof het beste ingezet kan worden en hoe (plaatsing bij de wortel of breedwerpige toediening). Voor situaties met een sterke vastlegging kan naast plaatsing van meststoffen of het gebruik van chelaten ook gedacht worden aan bladmeststoffen. Het toepassen van gecoat zaaizaad behoort ook tot de mogelijkheden.

Organische mest is een bron van spoorelementen, waardoor bemesting met Cu en Zn in Nederland slechts beperkt nodig is. De beperkte resultaten in de tropen geven aan dat mest vaak wel werkt (soms ook niet) maar veelal is het effect niet eenduidig alleen aan spoorelementen toe te schrijven daar met de mest ook N, P en K worden aangevoerd. Vaak wordt mest echter gedroogd en als brandstof gebruikt waardoor het niet beschikbaar is als meststof. De as zou als mest gebruikt kunnen worden maar dat wordt zelden gedaan. Het toepassen van compost is een optie. Compostering van afval wordt in ontwikkelingslanden echter weinig toegepast (Hoornweg et al., 1999).

Het toepassen van mest, compost en het laten liggen van gewasresten draagt bij aan het op peil houden en of verhogen van het organisch stofgehalte van de bodem en stimuleert het bodemleven. De natuurlijke bodemvruchtbaarheid, en als onderdeel daarvan de beschikbaarheid van spoorelementen, neemt daarmee toe.

5. Samengevat

De problematiek met spoorelementen is divers. Er zijn regio's waar ruim wordt omgegaan met spoorelementen en waaruit het oogpunt van het voorzorgsprincipe (milieu), voedselveiligheid, de toenemende schaarste aan spoorelementen efficiënter dient te worden omgegaan met spoorelementen. Anderzijds zijn er wereldwijd veel regio's waar de bodem te weinig spoorelementen bevat voor een goede gewasgroei en/of voorziening van dieren en mensen met voldoende spoorelementen.

De laatste decennia maakt kennisontwikkeling van het gedrag van spoorelementen in de bodem in combinatie met de ontwikkeling van nieuwe analytische technieken het mogelijk om de beschikbaarheid van spoorelementen in de bodem in relatie tot andere bodemparameters beter te duiden. Multi-nutriëntextractie met een zwak extractiemiddel in combinatie met een karakterisering van de vaste fase, bijvoorbeeld via spectroscopische technieken, lijkt de oplossingsrichting. Bovendien is zo een meer universele benadering mogelijk die overal inzetbaar is. Daardoor kan de regionale verscheidenheid in adviessystemen (en het daarmee gepaard gaande onderhoud) sterk verminderen. Uitontwikkeling en toepasbaar maken in operationele systemen is opgepakt maar heeft meer aandacht. Dit kan bijdragen aan meer duurzame voedselproductie en het verminderen van spoorelementengebrek in de landbouw wereldwijd. Van belang daarbij is niet alleen te kijken naar het spoorelementgebrek zelf maar ook naar achterliggende oorzaken als een te lage pH, interacties met andere nutriënten en een goede bodemstructuur.

Ook de inzet van lokale bronnen als mest, compost en gewasresten die de bodemkwaliteit verbeteren maar ook spoorelementen leveren verdient meer aandacht. In de tropen en ontwikkelingslanden zijn deze bronnen maar beperkt beschikbaar, waardoor de inzet van minerale spoorelement meststoffen nodig is. Op basis van kennis van de bodem kunnen deze meststoffen efficiënter worden ingezet, waardoor de kosten dalen en de opbrengsten stijgen.

Literatuur

- Aquilar A & Van Diest A (1981) Rock-phosphate mobilization induced by the alkaline uptake pattern of legumes utilizing symbiotically fixed nitrogen. *Plant and Soil* 61, 27-42.
- Ashley JTF (1996) Adsorption of Cu(II) and Zn(II) by estuarine, riverine and terrestrial humic acids. *Chemosphere* 33, 2175-2187.
- Bastein T (2011) 'Suppletie' van micronutriënten uit mijnbouw. TNO. Presentatie op de workshop 'Micronutriënten in de landbouw', 22 november 2011, Platform Landbouw Innovatie & Samenleving.
- Den Boer DJ, Haas MJM, Van der Draai H (2007) Verbeteren voorziening spoorelementen op melkveebedrijven in Drenthe. NMI-rapport 1314.N.502. Wageningen, pp.73.
- Brown D, Shepherd KD, Walsh MG 2006. Global soil characterization with VNIR diffuse reflectance spectroscopy. *Geoderma* 132, 273-290.
- Bussink DW & Temminghoff (2004). Soil and tissue testing for micronutrient status. The international Fertiliser Society (IFS). Proceedings 548. York, UK. pp 42.
- Cakmak I, Yilmaz A, Kalayci M, Ekiz H, Torun B, Erenoglu b & Braun HJ (1996) Zinc deficiency as a critical problem in wheat production in central Anatolia. *Plant & Soil* 180:165-172.
- Chang CW, Laird DA, Mausbach MJ & Hurburgh CR (2001). Near-infrared reflectance spectroscopy-principle components regression analyses of soil properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 65:480-490.
- COMV (2005) Handleiding Mineralenvoorziening Rundvee, Schapen, Geiten. Centraal Veevoederbureau, Lelystad, 228pp.
- EU (2003b) Opinion of the Scientific Committee for Animal Nutrition on the use of copper in feedingstuffs. (adopted on 19 February 2003). Brussels, pp 47.
- EU (2003b) Opinion of the Scientific Committee for Animal Nutrition on the use of zinc in feedingstuffs. (adopted on 14 March 2003). Brussels, pp 33.
- Gahoonia TS, Claassen N & Jungk A (1992) Mobilization of phosphate in different soils by ryegrass supplied with ammonium or nitrate. *Plant and Soil* 140, 241-248.
- Jacela JY, DeRouchey JM, Tokach MD, Goodband RD, Nelssen JL, Renter DG, Dritz SS (2010). Feed additives for swine: Fact sheets – high dietary levels of copper and zinc for young pigs, and phytase. *J Swine Health Prod.* 18: 87-91.
- Jones Jr JB (1998) Soil test methods: past, present, and future use of soil extractants. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 29, 1543-1352.
- Jongbloed A & Römken P (2009). Vele koper en zink in veevoerders zorgelijk. *V-focus februari 2009:* 42-43.
- Marschner H (1995) Mineral nutrition of higher plants. Academic Press, London. pp.889.
- McLaren RG, Lawson DM & Swift RS (1987) The availability to pasture plants of native and applied soil cobalt in relation to extractable soil cobalt and other soil properties. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 39, 101-112.
- Mengel K & Kirkby EA (1987) Principles of plant nutrition. Fourth edition, International Potash Institute, Bern, Switzerland, 687 pp.
- Kabata-Pendias A & Pendias H (2001) Trace elements in Soils and Plants. Third Edition. CRC Press, Boca Raton, Florida Moraghan & Mascagni, 1991.
- Römheld V & Marschner H (1990) Genotypical differences among graminaceous species in release of phytosiderophores and uptake of iron phytosiderophores. *Plant and Soil* 123, 147-153.
- Singh MV (2011) Scenario of Zinc Deficiency in Indian Soils and Its Influence on Zinc Enrichment in Crops for Improving Human and Animal Health. 3rd International Zinc Symposium Hyderabad, India, 10-14 October 2011.
- Temminghof EJM, Van der Zee SEATM & De Haan FAM (1998b) Copper speciation in sandy soil in relation to copper uptake and copper toxicity by ryegrass (*Lolium multiflorum* L.). In: Temminghof EJM. Chemical speciation of heavy metals in sandy soils in relation to availability and mobility. PhD dissertation, Landbouwniversiteit Wageningen.
- Thomson CJ, Marschner H & Römheld V (1993) Effect of nitrogen fertilizer form on pH of the bulk soil and rhizosphere, and on the growth, phosphorus, and micronutrient uptake of bean. *J. Plant Nutr.* 16, 493-506.

- Van Erp PJ & Van Beusichem ML, (1998). Soil and plant testing as a tool for optimizing fertilizer strategies. *Journal of Crop Production* 1, 53-80.
- Reuter DJ & Robinson JB (1986) *Plant analysis, an interpretation manual*. Inkata Press, Melbourne, Australië.
- Vliet J, Leendertse L, Bussink W & den Boer DJ (2009). Bodem voor Water. Slimme maatregelen ter vermindering van de zware metalen emissie in de melkveehouderij. CLM, Culemborg pp. 74.
- Voortman, R (2011) Micronutriënten in het wereldvoedselsysteem. Micronutriënten deficiënties, duurzaamheid en implicaties voor de onderzoeksagenda. Presentatie op de workshop 'Micronutriënten in de landbouw', 22 november 2011, Platform Landbouw Innovatie & Samenleving.
- Hoornweg D, Thomas L & Otten L (1999). *Composting and Its Applicability in Developing Countries*. The international bank for reconstruction and development/The World bank. Washington DC pp. 52.

Tabel 4. Gewasbehoefte en functies van spoorelementen, en factoren die de beschikbaarheid van en de behoefte aan spoorelementen beïnvloeden.

Micro-nutriënt	gewasbehoefte			functies in			factoren nadelig voor beschikbaarheid	behoefte aan meststoffen	opmerkingen
	hoog	medium	laag	Plant	Dier	mens			
Cu	bieten citrus haver luzerne sla spinazie ui tarwe	bloemkool broccoli gerst klaver komkommer maïs radijs tomaten uien wortelen	asperge aardappel bonen erwten grassen	van invloed op: • reproductie, slechte vruchtzetting • chlorofyl productie	• stofwisselings-enzymen (tekort geeft slechte conditie, groei, diarree)	• nodig voor vorming van bloed, bindweefsel botvorming, goed functioneren van afweersysteem, bloedstolling	• hoge pH • droogte • lage os- en zeer hoge os-gehalten	gelijkblijvend: • minder dierlijke mest • veehouderij veel mineralen-mengsels	• verbetering grondanalyse is mogelijk • S-bemesting op maat i.v.m. nadelig effect op Cu-beschikbaarheid dier • Let op voorziening kleipercelen
Zn	bonen citrus gierst fruitbomen maïs rijst spinazie ui vlas	aardappel bieten gerst komkommer luzerne sla tomaat	asperge erwten gras granen kool wortelen	• vele enzymen • betrokken bij synthese van aminozuren en eiwitten en vorming van groeihormoon auxine	• groei-processen • celdeling • wondheling	onderdeel van vele enzymen in lichaam • opbouw eiwitten • groei en vernieuwing van weefsel, • koolhydraat-stofwisseling, functioneren afweersysteem	• hoge pH • hoge os-gehalten • lage temperatuur • droogte • veel fosfaat • lichte zandgronden • (veel fosfaat)	geen tot enigszins • minder dierlijke mest • minder gewas-beschermings-middelen	• geen op grondonderzoek gebaseerd advies beschikbaar voor gevoelige gewassen • let op voorziening bij vollegrondsgroenteteelt