

39 MAG

NN02963

71230

1996-06-24 96633

551

andbouw universiteit

de kunst van  
goed bemesten

door prof. dr. ir. O. Oenema

# DE KUNST VAN GOED BEMESTEN

door prof.dr.ir. O. Oenema



Inaugurele rede uitgesproken op 13 juni 1996 ter gelegenheid van zijn benoeming door de Stichting Nutriënten Management Instituut NMI tot bijzonder hoogleraar Nutriëntenstromen en Bemesting aan de Landbouwuniversiteit te Wageningen

## DE KUNST VAN GOED BEMESTEN

*Mijnheer de Rector Magnificus, bestuur en directie NMI,  
familieleden en vrienden, geachte aanwezigen,*

Toediening van nutriënten in land- en tuinbouw is nodig om ook op termijn een rendabele gewasproductie te kunnen realiseren. Die stelling wordt breed ondersteund. Veel minder overeenstemming is er als het gaat om hoeveel nutriënten moeten worden toegediend. De belangen van landbouw enerzijds en natuur en milieu anderzijds lijken hier diametraal tegenover elkaar te staan. De verschillende reacties van landbouw- en milieuorganisaties op de voorgestelde normen voor stikstof en fosfaat in de *Integrale Notitie mest- en ammoniakbeleid* (3) weerspiegelen deze tegenstelling. Er is een te overbruggen kloof tussen landbouwkundig onvermijdbare en milieukundig acceptabele nutriëntenverliezen.

Mijn voordracht heeft als titel 'De kunst van goed bemesten'. Goed bemesten houdt in dat er zoveel nutriënten worden toegediend dat een rendabele landbouwproductie wordt gecombineerd met acceptabel lage nutriëntenverliezen, nu en op termijn. Kunst is hier niet bedoeld in de betekenis van 'niet natuurlijk'; met kunst wil ik onderstrepen dat goed bemesten bijzondere vaardigheden en kennis vereist. Met deze titel wil ik ook de wenselijkheid van meer interactie tussen wetenschap en praktijk benadrukken. Daartoe is de bijzondere leerstoel 'Nutriëntenstromen en bemesting' ook ingesteld; om het belang van wetenschappelijk onderzoek en onderwijs ten behoeve van zorgvuldig nutriëntenbeheer in de landbouw te accentueren. Het onderwerp 'Nutriëntenstromen en bemesting' is een maatschappelijk praktijkvraagstuk. De leerstoel vervult daarmee een brugfunctie tussen wetenschap en praktijk.

In het eerste deel van mijn voordracht zal ik aangeven dat voor goed bemesten kennis nodig is van de basisprincipes van nutriëntenkringlopen. Effecten van bemesting op

nutriëntenkringlopen in het algemeen en op gewasopbrengst en -kwaliteit en op nutriëntenverliezen komen daarna aan de beurt. Vervolgens wil ik ingaan op de mogelijkheden van sturing van nutriëntenstromen. Tenslotte volgen enkele conclusies

### **Nutriëntenkringlopen**

Het leven op aarde, de biosfeer, is afhankelijk van de kringloop van elementen. Omgekeerd beïnvloedt de biosfeer deze kringlopen. De primaire krachten achter de kringlopen zijn de zon, bewegingen in de aardkorst, de zwaartekracht en de hoofdwetten van de thermodynamica (8,21).

Fotosynthetiserende organismen benutten de energie van de zon om geoxideerde koolstof te reduceren tot energierijke organische verbindingen én om noodzakelijke nutriënten op te nemen. Deze organismen staan aan de basis van de biogeochemische nutriëntenkringloop. Heterotrofe organismen benutten vervolgens de energie die vrijkomt bij de oxidatie van de gereduceerde verbindingen. Daarbij komen de nutriënten weer vrij uit het organische materiaal.

Transformatie- en transportprocessen samen bepalen richting en grootte van de biogeochemische nutriëntenkringlopen. Belangrijke transformatieprocessen zijn oxidatie-reductieprocessen. Deze processen gaan gepaard met overdracht van energie, elektronen en protonen. Ook de mobiliteit van de getransformeerde verbindingen verandert daarbij. Elementen als koolstof, zuurstof, waterstof, stikstof en zwavel zijn in bepaalde oxidatie-reductie toestanden gasvormig en ontwijken daardoor gemakkelijk naar de atmosfeer. In de atmosfeer kunnen deze verbindingen over grote afstanden worden vervoerd. Voor niet-vluchtige maar wel oplosbare verbindingen is water het belangrijkste transportmedium. De hoeveelheid in water opgelost materiaal wordt bepaald door de kinetiek van oplossing-precipitatie, adsorptie-desorptie en oxidatie-reductie. Tenslotte dragen dieren en mensen bij aan het transport van nutriënten. Aldus bepalen biogeochemische

transformatieprocessen en fysische transportprocessen samen de kringloop van nutriënten.

Kringlopen van koolstof, zuurstof, stikstof en zwavel zijn via organische stof aan elkaar gekoppeld. Die koppeling heeft zijn basis op celniveau in autotrofe en heterotrofe organismen (8). Ook met andere elementen zoals fosfor, calcium en ijzer zijn er interacties. De kringlopen van alle elementen samen vormen een complex en dynamisch netwerk, dat samenhangt met en wordt beïnvloed door de geologische en biologische evoluties. Vladimir Iwanowitsch Vernadskij (1863-1945) is één van de eersten geweest die gewezen heeft op de rol van biogeochemische en geologische processen in de kringloop van nutriënten en andere elementen. De Scientific Committee on Problems of the Environment (SCOPE) heeft vanaf de jaren zeventig het onderzoek naar de kringloop van nutriënten en andere elementen op aarde sterk aangemoedigd. Analyse van veranderingen in kringlopen is namelijk een krachtig instrument om milieuproblemen, zoals verzuring, bodem- en luchtverontreiniging, eutrofiëring en klimaatverandering op hun effecten te beoordelen.

Nutriëntenkringlopen kunnen worden gekarakteriseerd, op verschillende ruimte- en tijdschalen, door compartimenten (reservoirs), nutriëntenstromen tussen compartimenten en transformatieprocessen. *Mondiale kringlopen beschrijven de belangrijkste compartimenten en stromen op aarde. Ze weerspiegelen het effect van biogeochemische processen op geologische tijdschaal. De kringlopen in een (eco)systeem weerspiegelen de biogeochemische processen en fysische transportprocessen van dat specifieke systeem. Kwantitatieve analyse van nutriëntenkringlopen verschaft inzicht in de grootte van compartimenten en nutriëntenstromen en dus in het functioneren van het systeem (4).*

De zogenoemde interne kringloop beschrijft de cirkelgang van nutriënten binnen een systeem. De externe kringloop beschrijft de gang van nutriënten die een systeem inkomen en verlaten en

geeft dus de interactie weer met andere systemen (4,10). In natuurlijke systemen zoals bijvoorbeeld in veel bossen en natuurlijke graslanden domineert de interne kringloop. Jaarlijks circuleren hier vaak honderden kg nutriënten per ha tussen de compartimenten bodem, bovengrondse vegetatie en heterotrofe organismen, terwijl de uitwisseling met omringende systemen meestal veel minder is dan enkele tientallen kg per ha per jaar. In de landbouw gaat het om de oogst en diens gevolge is hier de externe kringloop relatief belangrijk (10). Vooral in intensieve landbouwsystemen is de externe kringloop belangrijk, culminerend in de tuinbouw onder glas, waar in de substraatteelt de interne kringloop vrijwel is uitgesloten.

Verhoudingen tussen stabiele isotopen van koolstof, stikstof, zuurstof en zwavel, onderling en in combinatie, verschaffen informatie over de herkomst en bron van deze elementen. Ze zijn daarmee een waardevol instrument bij de analyse van sommige nutriëntenstromen. Lichte isotopen zijn namelijk mobieler dan zware isotopen. Bij oxidatie-reductieprocessen geven micro-organismen bovendien de voorkeur aan lichte isotopen boven zware isotopen. De verschillen in mobiliteit en affiniteit leiden tot fractionering van isotopen in compartimenten. De verhoudingen van bijvoorbeeld  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  in  $\text{CO}_2$  en  $\text{CH}_4$  en van  $^{34}\text{S}/^{32}\text{S}$  in  $\text{SO}_2$  in de atmosfeer kunnen bijvoorbeeld worden vertaald in hoeveelheden  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  en  $\text{SO}_2$  die mede door toedoen van de mens in de atmosfeer zijn gebracht (5,21). De verhoudingen van  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  en  $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$  in nitraat en lachgas in de bodem verschaffen informatie over welk deel van de stikstof afkomstig is van atmosferische depositie, meststoffen en biologische N-binding (14,29). In het kader van een EU-project is recent voorgesteld om stabiele isotopen van zuurstof en stikstof te gebruiken teneinde een indruk te krijgen van de relatieve bijdragen van de microbiologische processen nitrificatie en denitrificatie aan de emissie van stikstofoxides uit grasland. De hypothese hierbij is dat de  $\delta^{18}\text{O}$  in lachgas ( $\text{N}_2\text{O}$ ) ongeveer 22 ‰ is indien nitrificatie de bron is en minder dan circa 5 ‰ indien denitrificatie de bron is. Het verschil in discriminatie van  $^{15}\text{N}$  en  $\text{N}^{14}\text{N}$  tussen nitrificeerders en

denitrificeerders leidt bovendien tot verschillen in  $\delta^{15}\text{N}$ . Verondersteld wordt dat mede op basis van kennis over de bron van stikstofoxides in bodems bemestingsstrategieën kunnen worden ontwikkeld waardoor emissies van stikstofoxides worden beperkt. De stikstofvorm van de meststof en hoeveelheid en tijdstip van toediening zijn naar verwachting de belangrijke instrumenten in deze strategieën.

### **Bemesting en nutriëntenkringlopen**

Bemesting heeft direct en indirect effect op biogeochemische nutriëntenkringlopen. Deze effecten strekken zich uit van lokale en regionale tot mondiale schaal. Dat geldt voor alle nutriënten, maar vooral voor stikstof.

Om tegemoet te komen aan de toenemende vraag naar voedsel in de wereld zijn productie en gebruik van minerale meststoffen in de laatste vijftig jaar vertienvoudigd en is het oppervlak landbouwgrond sterk toegenomen. In de komende decennia zal de vraag naar voedsel door de snel groeiende wereldbevolking verder toenemen. Om in deze voedselbehoefte te kunnen voorzien zal het meststoffengebruik, uitgedrukt in kg per ha landbouwgrond, ook toenemen. Veel alternatieven zijn er niet. Het resterende landoppervlak, dat nog in gebruik kan worden genomen, is immers zeer gering. Intensivering van de productie per ha is derhalve nodig; is het niet in Nederland of West-Europa dan toch zeker in grote delen van Afrika, Azië en Zuid-Amerika. In een recente SCOPE-studie is aangegeven dat het gebruik van fosfaatmeststoffen in Azië zou moeten verdubbelen en dat in Afrika zou moeten verviervoudigen teneinde de voedselproductie daar veilig te stellen (23). Inherent aan deze toename van het meststoffengebruik zullen de effecten van bemesting op nutriëntenkringlopen een grootschaliger karakter krijgen. Het is onze maatschappelijke verantwoordelijkheid om daar waar mogelijk maatregelen te treffen teneinde ongewenste neveneffecten van grootschalig meststoffengebruik te beperken. Verdere verhoging van de efficiëntie van het meststoffengebruik is de eerste en meest voor de hand liggende maatregel.

Analyse van de effecten van bemesting op nutriëntenkringlopen op verschillende schaalniveaus is nodig om de juiste bemestingsstrategieën te kunnen ontwikkelen die ongewenste neveneffecten minimaliseren. De kennis van de effecten op mondiale kringlopen is nu nog beperkt. Niet alleen ontbreken er vaak harde gegevens, ook zijn er methodische problemen om een emissie aan een bepaalde bron toe te wijzen. Het leggen van een simpele correlatie tussen bijvoorbeeld het gebruik van stikstofmeststoffen in de wereld en de toename van de concentratie van nitraat in de sneeuw op de Zuidpool, zoals recent door Turner (25) is gedaan, is suggestief en daardoor misleidend.

Op perceels- en bedrijfsniveau is de kennis over effecten van bemesting op nutriëntenstromen fors toegenomen in de laatste decennia. Daar hebben betere meettechnieken aan bijgedragen. Toepassing van die kennis in bemestingsadviezen en nutriëntenmanagementprogramma's is echter nog verre van volmaakt. Ik kom daar later in mijn betoog op terug.

#### **Bemesting en gewasopbrengst en -kwaliteit**

Volgens Van Dale is bemesting 'het toedienen van mest om de grond vruchtbaar te maken'. Bijna 30 jaar geleden stelde professor Van Diest in zijn oratie 'Bemest men de plant of de grond?' (9) dat de aandacht meer gericht moet zijn op de plant dan op de grond en dat in een hoog ontwikkelde landbouw een chemisch rijke grond van minder belang is dan een fysisch goede grond. Het lijkt er op dat men in de substraatteelt zijn advies letterlijk heeft opgevolgd. Uit overzichten van de bodemvruchtbaarheidstoestand van landbouwgrond in Nederland (20) blijkt echter dat het overgrote deel van de landbouwpraktijk zijn betoog over de beperkte waarde van chemische bodemvruchtbaarheid onvoldoende ter harte heeft genomen. Vanwege de plaatselijk grote meststoverschotten maar tevens ter vermijding van risico's op opbrengstderving is de gemiddelde fosfaattoestand van landbouwgrond in Nederland thans te karakteriseren als ruim voldoende tot hoog. Ook



volgens buitenlandse maatstaven zijn Nederlandse  
landbouwgronden rijk aan fosfaat (24).

De relatieve beschikbaarheid van nutriënten in grond wordt veelal bepaald door chemisch grondonderzoek. De resultaten van het grondonderzoek geven aan of bemesting al dan niet nodig is om een hoge gewasopbrengst en -kwaliteit te realiseren. Bij de analyse van de relaties tussen bemesting en gewasopbrengst en -kwaliteit zijn drie-kwadranten-figuren en simulatiemodellen uitstekende hulpmiddelen. Via drie-kwadranten-figuren kunnen even eenvoudig als doeltreffend drie belangrijke indicatoren voor de opbrengstreactie worden gekwantificeerd, namelijk (i) de nutriëntenopname en gewasopbrengst zonder bemesting, (ii) de fractie van de toegediende meststof die door het gewas wordt opgenomen, en (iii) de efficiëntie van de gewasproductie, uitgedrukt in kg drogestof per kg opgenomen nutriënt.

Er is reeds veel kennis aanwezig over factoren die de drie genoemde indicatoren beïnvloeden. Maar toch blijft de noodzaak aanwezig voor een verdergaande verdieping van die kennis om de efficiëntie van het nutriëntengebruik verder te verhogen.

De efficiëntie van de droge-stofproductie is niet alleen afhankelijk van de verhouding tussen vraag en aanbod van nutriënten, maar ook van de beschikbaarheid van water en het optreden van bijvoorbeeld ziekte in het gewas. Een goede balans tussen water- en nutriëntenvoorziening in combinatie met doelmatige gewasbescherming en onkruidbeheer zijn derhalve essentieel voor zowel een hoog elementrendement als voor een hoge efficiëntie van de droge-stofproductie.

In grote delen van Duitsland, Frankrijk, het Verenigd Koninkrijk en Ierland wordt in toenemende mate zwavelgebrek geconstateerd bij de teelt van koolzaad en tarwe en op grasland. Deze toename in zwavelgebrek heeft vooral te maken met de reductie van  $SO_2$ -emissies en met veranderingen in het meststoffengebruik (7). Verkennend onderzoek heeft aangetoond dat zwavelgebrek in Nederland nog slechts in heel

beperkte mate optreedt, dit wil zeggen alleen op die zandgronden waaraan in het voorjaar geen dierlijke mest of andere zwavelhoudende meststoffen worden toegediend. Omdat de reductie in de uitstoot van  $\text{SO}_2$  waarschijnlijk nog zal voortschrijden, is blijvende aandacht geboden. Het niet tijdig onderkennen van zwavelgebrek kan de efficiëntie van de drogestofproductie voor stikstof en fosfaat verminderen.

De kwaliteit van het afgeleverde product bepaalt in toenemende mate het financiële resultaat in de land- en tuinbouw. Via bemesting kan daarop ingespeeld worden. Zowel een tekort als een overmaat aan nutriënten beïnvloedt namelijk de gewaskwaliteit in negatieve zin. Dat geldt in het bijzonder voor stikstof, maar ook voor kalium, zwavel en een aantal micronutriënten. Voor de meest gangbare gewassen in Nederland bestaat hierover reeds veel informatie. Deze informatie zal in toenemende mate operationeel moeten worden gemaakt, omdat kwaliteit een steeds belangrijker criterium voor de prijs van het product wordt.

Bij sommige gewassen wordt de hoogste kwaliteit gerealiseerd bij een bemestingsniveau dat hoger is dan dat waarbij de optimale gewasopbrengst wordt gerealiseerd. Dat geldt voor sommige teelten onder glas en bijvoorbeeld voor tarwe. Om een goede bakkwaliteit te realiseren moet er voldoende stikstof en zwavel in de tarwekorrel aanwezig zijn. De daarvoor gewenste gehalten worden meestal pas gerealiseerd bij stikstof- en zwavelgiften die hoger zijn dan die waarbij de optimale opbrengst wordt gerealiseerd. Bij veel andere gewassen is dat echter juist andersom. Bijvoorbeeld bij suikerbieten en aardappelen neemt de kwaliteit in termen van respectievelijk suikergehalte en frietkwaliteit af naarmate het stikstofaanbod hoger is. Het streven naar een hogere kwaliteit van het plantaardig product resulteert dan ook in de vraag naar meer fijnregeling in de bemesting, omdat het betrouwbaarheidsinterval van de optimale gift kleiner wordt naarmate kwaliteit belangrijker wordt.

Invoering van het stelsel van heffingen op te hoge stikstof- en fosfaatoverschotten (3) heeft een vergelijkbaar effect. Te lage giften leiden tot opbrengstderving, te hoge giften brengen progressief stijgende kosten verbonden met heffingen met zich mee. Dit betekent dat de relatie tussen bemesting en opbrengst veel vaker zal kunnen worden beschreven met behulp van een kwadratisch model of lineair-plateau model dan met behulp van de nu gangbare Mitscherlich-vergelijking. De eerder genoemde modellen weerspiegelen immers veel beter het nauwe betrouwbaarheidsinterval van de optimale nutriëntengift dan de Mitscherlich-vergelijking. Overwogen moet worden het kwadratisch model of het lineair-plateau model ook toe te passen bij de noodzakelijke herziening van de bemestingsadviezen in de land- en tuinbouw. Toepassing zal leiden tot bijstelling naar gemiddeld lagere adviesgiften en lagere streefwaarden voor bodemvruchtbaarheidsindices voor fosfaat.

Het toedienen van beperkte hoeveelheden nutriënten op het juiste moment en op de juiste wijze wordt dus steeds belangrijker. Dat vraagt om goed te doseren meststoffen van de juiste kwaliteit en samenstelling en om toedieningstechnieken waarbij de plant de toegediende nutriënten snel kan opnemen. Computergestuurde en locatie-specifieke toedieningsapparatuur, fertigatie, bladbemesting en druppelirrigatie bieden technisch de mogelijkheden om steeds preciezer meststoffen en water toe te dienen. De beperkingen zitten vaak in het bepalen van de hoeveelheid en het tijdstip van toediening. Er is dan ook een toenemende vraag naar eenvoudig toe te passen sensoren, indicatoren en bijbemestingssystemen die al dan niet in combinatie met simulatiemodellen ondersteuning geven bij de sturing van de bemesting. De perspectieven lijken nu groter dan ooit. Technologisch is er immers steeds meer mogelijk en bij de consument wordt productkwaliteit een steeds belangrijker criterium. Het is dan ook van het grootste belang dat voortvarend wordt ingespeeld op de mogelijkheden van nieuwe technologieën.

### **Bemesting en nutriëntenverliezen**

Die nieuwe ontwikkelingen zijn vooral ook nodig om verliezen te beperken. De notie dat nutriëntenkringlopen lekken, is zo oud als het idee van nutriëntenkringlopen zelf. Lekverliezen zijn inherent aan de aard van de biogeochemische processen. Een gesloten nutriëntenkringloop in de landbouw is dus een *contradictio in terminis*. Alleen mondiale nutriëntenkringlopen kunnen als gesloten kringlopen worden beschouwd (ook al verdwijnt er stikstof naar de ruimte). Naarmate het systeem enger wordt gedefinieerd, zijn de verliezen in het algemeen groter, al bestaan er grote verschillen tussen systemen. Verliezen zijn vaak hoog als organismen van hogere trofische niveau, zoals mensen en gewervelde dieren, in het systeem aanwezig zijn.

Naar analogie van de indeling in opbrengstregulerende factoren kunnen globaal de volgende verliesregulerende factoren worden onderscheiden:

- verliesbepalende factoren: klimaat, bodemtype, geomorfologie, oogst van gewassen, het houden van vee;
- verliesverhogende factoren: veranderend landgebruik, bemesting; en
- verliesbeperkende factoren: management

Om een hoge gewasopbrengst en -kwaliteit te verkrijgen, worden in de landbouw veelal eenjarige monoculturen geteeld en geoogst in een juveniel stadium. Dit bepaalt dat verliezen hoger zijn dan in een natuurlijk systeem met hoge biodiversiteit en veeljarige planten. In de landbouw wordt de interne nutriëntenkringloop herhaald onderbroken (10). Toediening van nutriënten via bemesting en verandering in landgebruik, zoals het omploegen van grasland in bouwland, leidt tot het in omloop brengen van meer nutriënten en tot hogere verliezen. Door juist management kunnen verliezen worden beperkt.

De wet van de verminderende meeropbrengsten leidt tot de verwachting dat nutriëntenverliezen meer dan evenredig toenemen met een toename van de hoogte van de bemesting. Die onevenredigheid wordt soms ook waargenomen. Een

voorbeeld hiervan is het stikstofverlies in de vorm van nitraatuitspoeling en ammoniakvervluchtiging op beweid grasland. Vaak echter is de relatie tussen bemesting en nutriëntenverlies diffuus. Dat wordt veroorzaakt door zowel de bufferende werking van de bodem als door verschillende terugkoppelingen in het systeem via biogeochemische processen en fysische transportprocessen. Inzicht in de bufferende werking van de bodem en in de fysische en biogeochemische processen is dus essentieel om goede input-output relaties vast te kunnen stellen.

De bufferende werking van de bodem is eindig al zijn er grote verschillen tussen bodemtypes. Naarmate een groter deel van de buffercapaciteit is verbruikt, neemt de kans op 'doorbraak' en dus op verlies toe. Voor zandgronden zijn analysemethoden en modellen voorhanden om de fosfaatbuffercapaciteit vast te stellen en het moment van doorbraak te voorspellen. De onzekerheid van deze voorspellingen voor veldsituaties is echter nog tamelijk groot. Deze onzekerheden worden deels veroorzaakt door een gebrekkige toetsing van onderdelen van die modellen in het veld, deels ook door complicerende factoren zoals bodemheterogeniteit en preferent transport. Het is juist daarom dat er meer aandacht moet worden geschonken aan bodemheterogeniteit, preferent transport en modelvalidatie.

Een aanzienlijk deel van de fosfaatbuffercapaciteit van landbouwgronden in Nederland is reeds verbruikt. Verkennende studies geven aan dat er een grote en langdurige inspanning nodig is, om de belasting van grond- en oppervlaktewater door fosfaatuitspoeling uit gronden, die nu of op korte termijn doorslaan, tot een acceptabel niveau te beperken. Voor een doelmatig beheer van die gronden moet fosfaat door gewassen aan deze gronden worden onttrokken, d.w.z. de afvoer van fosfaat via het gewas moet groter zijn dan de aanvoer via bemesting. Aanvullend daarop zullen plaatselijk verdergaande maatregelen moeten worden getroffen. Deze maatregelen hebben betrekking op vergroting van de fosfaatbuffercapaciteit van de bodem en op verwijdering van fosfaat uit het

oppervlaktewater. Aan beide type maatregelen zijn forse kosten verbonden, in orde van grootte van enkele tientallen tot honderden guldens per kg fosfor per ha die extra in de bodem kan worden vastgelegd of uit het oppervlaktewater wordt verwijderd. Voor landbouwgronden die lekken naar eutrofiëringsgevoelige oppervlaktewateren zullen deze kosten moeten worden meegenomen bij het bepalen van de marginale opbrengst van fosfaatbemesting. Financiële compensatie van de boer bij drastische beperking van de fosfaatbemesting is hier te prefereren boven dure saneringsmaatregelen. De algemene stelregel dat preventieve maatregelen goedkoper zijn dan curatieve maatregelen lijkt ook hier op te gaan.

Algemeen wordt aangenomen dat gewassen fosfaat voor meer dan 90% uit de bovenste 20 cm van de bodem halen. Voor doelmatig beheer van gronden die ook in de ondergrond veel fosfaat bevatten zijn gewassen nodig die fosfaat aan de ondergrond kunnen onttrekken. Er is dan ook dringende behoefte aan meer generieke kennis over teeltmaatregelen die fosfaatonttrekking uit de ondergrond bevorderen. Een goede bodemstructuur, ontwatering en pH zijn bekende en bewezen randvoorwaarden voor een goede fosfaatopname. Verdieping en het operationeel maken van die kennis is nodig om te voorkomen dat toekomstig beleid wordt gefrustreerd door het optreden van fosfaatgebrek bij gewassen geteeld op gronden die volgens de definitie 'fosfaatverzadigd' zijn. Een kleine startgift fosfaat kan mogelijk de wortelgroei van het gewas dermate stimuleren waardoor meer fosfaat aan de ondergrond wordt onttrokken dan zonder bemesting. Onderzoek naar fosfaatdesorptie en fosfaatonttrekking door gewassen uit de ondergrond heeft derhalve hoge prioriteit. Het meer fundamentele onderzoek van de vakgroep Bodemkunde en Plantevoeding naar de desorptiekinetiek en het meer toepassingsgerichte onderzoek van AB-DLO en SC-DLO sluiten hier goed op elkaar aan.

De relatie tussen stikstofbemesting en stikstofverliezen is al meer dan een eeuw onderwerp van onderzoek en een groot aantal

modellen is ontwikkeld waarmee die relatie kan worden gesimuleerd voor verschillende omstandigheden. Toepassing van die kennis in de praktijk is echter nog beperkt, vooral ook omdat de voorspelde stikstofverliezen omgeven zijn met een groot betrouwbaarheidsinterval. Deze relatieve onbetrouwbaarheid wordt enerzijds veroorzaakt door het stochastische karakter van de biogeochemische processen die ten grondslag liggen aan stikstofverliezen, anderzijds door gebrek aan kennis van de kinetiek van deze processen. Het traceren en kwantificeren van alle stikstofverliezen levert nog steeds zoveel moeilijkheden op, vooral op beweid grasland, dat het gemeten verschil tussen de totale aan- en afvoer van stikstof op perceel- en bedrijfsniveau onvoldoende kan worden verklaard. Dat heeft geleid tot uitdrukkingen als 'the enigma of the nitrogen balance' (2), 'unaccounted for nitrogen' (12) en 'het gat op de stikstofbalans' (16).

NMI en de Vakgroep Bodemkunde en Plantevoeding hebben in samenwerking met andere instellingen de laatste jaren veel onderzoek verricht naar de relatie tussen stikstofbemesting van grasland en gasvormige stikstofverliezen. Door Wim Bussink is vastgesteld dat ammoniakvervluchtiging uit beweid grasland op kleigrond minder dan 10 procent bedraagt van de door het vee uitgescheiden stikstof (6). Hij heeft recent ook aangegeven dat tengevolge van kleine verschillen in weersgesteldheden het gebruik van kalkammonsalpeter in Nederland te prefereren is boven ureum, terwijl dat in Ierland en Engeland juist andersom is.

Uit intensieve veldmetingen van Gerard Velthof blijkt dat op zand- en kleigronden circa 1 procent van de op grasland toegediende stikstof als lachgas verloren gaat. Op veengronden varieert dat van 2 tot 4 procent (26). Op beweid grasland blijken urine- en mestplekken grote bronnen van lachgas te zijn. Gemiddeld genomen verdwijnt uit mest- en urinstikstof twee keer zoveel lachgas als uit kunstmeststikstof. Het beweide en ontwaterde veengrasland in Nederland behoort tot het areaal landbouwgrond op de wereld met de hoogste lachgasemissie. De

talrijke factoren, die de complexe biogeochemische processen van lachgasproductie beïnvloeden, hebben tot nu toe verhinderd dat duidelijke uitspraken konden worden gedaan over de lineariteit van de relatie tussen stikstofbemesting en lachgasemissie.

Werk van Jan Geert Koops toont aan dat op veengrasland nitrificatie een belangrijke bron is van lachgasproductie (15). Via gekoppelde nitrificatie-denitrificatie kan dit lachgas worden gereduceerd tot stikstofgas ( $N_2$ ). Het belang hiervan is dat stikstof op een heel milieuveilige en natuurlijke wijze verloren gaat; met de huidige standaardmeettechnieken voor denitrificatie en lachgasemissie wordt dit verlies niet gemeten. Mogelijk ligt hier een deel van de verklaring voor het eerder genoemde gat op de stikstofbalans.

Aan het eind van de jaren tachtig werd aangetoond dat door stikstofbemesting de consumptie van atmosferisch  $CH_4$  door de bodem vermindert (17). Uit werk van Agnes van den Pol - Van Dasselaar blijkt dat voor Nederlands grasland dat effect heel gering is (19). Mogelijk krijgen methaanoxiderende bacteriën in Nederland reeds zoveel stikstof uit de atmosfeer aangeboden dat bemesting slechts een marginaal effect veroorzaakt. Haar werk toont bovendien aan dat door een verschil in ontwatering cultuurgrasland op veengrond netto methaan consumeert en natuurlijk grasland een forse hoeveelheid methaan naar de atmosfeer emiteert.

Dit onderzoek heeft de milieukundige consequenties van stikstofbemesting veel beter in kaart gebracht. Daarop voortbouwend is een begin gemaakt met het verkennen van de mogelijkheden om deze kennis te implementeren in het nutriëntenmanagement op bedrijfsniveau. Verdergaande verkenningen zijn hier nog nodig.

#### **Nutriëntenbalansen**

De nutriëntenbalans of mineralenbalans is sinds enkele jaren bij



alle boeren bekend. Het is namelijk een elegante manier om de richting en grootte van nutriëntenstromen in en uit een bedrijf, systeem of compartiment weer te geven. De eerste nutriëntenbalansen, op perceelsniveau maar ook op de schaal van een natie, zijn al meer dan een eeuw geleden opgesteld. Nutriëntenbalansen op bedrijfsniveau hebben pas vanaf het einde van de jaren zeventig in het onderzoek aandacht gekregen. Dat late tijdstip is opmerkelijk omdat juist op bedrijfsniveau het management plaatsvindt en op dit niveau bij uitstek de effecten van bedrijfsvoering tot uiting komen.

De nutriëntenbalans is een prima management- en voorlichtingsinstrument. Het aanschouwelijk maken van het overschot op de nutriëntenbalans heeft het draagvlak in de praktijk voor vermindering van dat overschot vergroot. De vaak grote variatie in overschotten tussen overigens vergelijkbare bedrijven geeft bovendien het vertrouwen dat er mogelijkheden zijn voor verkleining van dat overschot op vele praktijkbedrijven.

Om te kunnen fungeren als effectief beleids- en managementinstrument moet een nutriëntenbalans betrouwbaar zijn en de juiste informatie verschaffen. Voor controle van overheidswege kan worden volstaan het landbouwbedrijf te beschouwen als een black-box systeem met één compartiment, waarbij alleen de inkomende en uitgaande nutriëntenstromen relevant zijn. Voor sturing van nutriëntenstromen binnen een rundveebedrijf is het noodzakelijk om minimaal vier compartimenten te onderscheiden, namelijk bodem, gewas, dier en mest. Per transitie van het ene compartiment naar het andere kunnen kritische getalswaarden worden vastgesteld die informatie verschaffen over de efficiëntie van de deelstromen (1). Het is dringend nodig om die kritische getalswaarden beter te onderbouwen en te gebruiken als indicatoren voor de mate van succes in de sturing van nutriëntenstromen.

Het verschil tussen aanvoer van nutriënten via bemesting, veevoer, depositie, en biologische fixatie en afvoer via marktbaar producten is een maat voor de ophoping of verarming van nutriënten en voor potentiële verliezen. Bij beoordeling van dit

verschil is het niveau van het nutriëntenreservoir van de bodem van belang. Een fosfaatoverschot op de balans moet immers heel anders worden geïnterpreteerd bij een lage dan bij een hoge fosfaattoestand van de bodem. Tot nu toe is er geen bevredigende en in de praktijk toepasbare koppeling tussen bodemvruchtbaarheidsindices en resultaten van de nutriëntenbalans gerealiseerd. Dat is jammer. In de bemestingsadviesbases bijvoorbeeld zijn de adviesgiften gekoppeld aan bodemvruchtbaarheidsindices. Zo is bij een lage fosfaattoestand van de bodem de geadviseerde fosfaatgift hoog en bij een hoge toestand is het advies om geen fosfaat toe te dienen. Koppeling van de principes van de bemestingsadviesbases aan die van de nutriëntenbalans ligt dus voor de hand. Die koppeling kan op verschillende wijzen tot stand worden gebracht, waarbij een balans moet worden gevonden tussen eenvoud en betrouwbaarheid.

De vraag is hoe betrouwbaar een nutriëntenbalans kan worden opgesteld, en hoe onnauwkeurigheden en onzekerheden zich vertalen in af te leiden diagnostische drempelwaarden en indicatoren. Vrijwel alle balansen zijn gebaseerd op gemiddelden van één of meerdere waarnemingen per balanspost, zonder rekening te houden met de spreiding daaromheen. Voor de gemeten of berekende aanvoer via bemesting, veevoer, atmosferische depositie en biologische fixatie, en de afvoer in marktbaar producten is de spreiding rondom het (wetenschappelijk) gemiddelde relatief gering. Op bedrijfsniveau is de relatieve standaardafwijking van de gemiddelde aanvoer van nutriënten via meststoffen en veevoer en van de afvoer via marktbaar producten in de orde van grootte van 5 procent. Voor de aan- en afvoer van nutriënten via dierlijke mest bedraagt dat percentage al gauw meer dan 10 procent. Relatieve standaardafwijkingen van gemiddelde nutriëntenverliezen door uit- en afspoeling en vervluchtiging zijn vaak in de orde van grootte van tientallen en honderden procenten.

Het overschot op de nutriëntenbalans is een sluitpost, dat wil zeggen de grootte wordt geschat uit het verschil tussen alle

gemeten en/of geschatte aan- en afvoerposten. Het nadeel van een sluitpost is dat alle fouten, die samenhangen met de schatting van andere posten en met het over het hoofd zien van mogelijke posten, zich ophopen in het resultaat van de sluitpost. Impliciet betekent dit dat op bedrijven die veel dierlijke mest afvoeren of aanvoeren de stikstof- en fosfaatoverschotten minder betrouwbaar kunnen worden vastgesteld dan op bedrijven die geen dierlijke mest verhandelen. Dat verschil in grootte van het betrouwbaarheidsinterval kan oplopen tot meer dan een factor twee. Omdat een deel van de variatie samenhangt met mogelijke systematische fouten bij de bemonstering en analyse van mest (13) kan dit in sommige situaties forse consequenties hebben. Systematische fouten leiden namelijk tot een systematische overschatting of onderschatting van het nutriëntenoverschot. Het is in het belang van boer en milieu dat dergelijke fouten worden beperkt.

De vraag resteert of de nutriëntenbalansmethodologie wel voldoende operationeel gemaakt is als instrument voor nutriëntenmanagement.

### **Nutriëntenmanagement**

De nutriëntenbalans is een essentieel instrument van nutriëntenmanagement. Nutriëntenmanagement is het besluitvormingsproces dat betrekking heeft op de toediening van nutriënten en op die onderdelen van de bedrijfsvoering die nutriëntenstromen en -verliezen beïnvloeden (18). Het is een cyclisch proces, met *analyse* van de mogelijkheden, knelpunten en randvoorwaarden als eerste stap. Daarna volgen *planvorming*, op basis van de verrichte analyses, *besluitvorming*, *implementatie* van het gekozen plan en tenslotte *controle* als essentiële laatste stap.

Nutriëntenmanagement is een integraal onderdeel van de bedrijfsvoering, waarbij onderscheid wordt gemaakt tussen besluitvorming op strategisch niveau, tactisch niveau en operationeel niveau (18). Op strategisch niveau worden de

doelen voor de lange termijn vastgelegd, zoals bijvoorbeeld omvang en type van het bedrijf. Daarmee worden de basis van het bedrijf en ook de mogelijkheden van effectief sturen op lagere managementniveaus vastgelegd. Op tactisch niveau vindt besluitvorming plaats die te maken heeft met keuzes per groeiseizoen, teelt en bouwplan. Het betreft onder andere het opstellen van een bemestingsplan, keuze van gewassoorten, teelt van nagewassen, grondbewerking, etc. De consequenties van de besluitvorming op dit niveau zijn vaak groot. Besluitvorming op operationeel niveau heeft te maken met activiteiten waar over niet zelden binnen het tijdsbestek van een dag keuzes moeten worden gemaakt. De strategische en tactische plannen dienen hierbij als basis. Voorbeelden van operationele besluiten zijn: wanneer en hoeveel (bij)bemesten en beregenen, wanneer grondbewerken, zaaien en oogsten. Goed bemesten vereist inzicht in alle factoren die nutriëntenstromen beïnvloeden.

Op bedrijfsniveau is de boer de directe stuurder en uitvoerder van nutriëntenmanagement; de nationale en regionale overheden, markt, afzetorganisaties, etc., zijn stuurders op afstand. Deze stuurders op afstand beperken de speelruimte van de boer in het bijsturen van de externe nutriëntenstromen, vooral op de korte termijn. Voor de interne nutriëntenkringloop op het bedrijf zijn micro- en macro-organismen, het gewas en de weersomstandigheden de directe stuurders en is de boer meer een bestuurder op afstand.

Het is duidelijk dat nutriëntenstromen die het bedrijf binnenkomen via meststoffen en veevoer en die het bedrijf verlaten via marktbaar producten gemakkelijker zijn te sturen dan de interne stromen op het bedrijf. Maar juist een betere benutting van nutriënten uit de interne nutriëntenreservoirs is nodig om te komen tot de gewenste verhoging van de efficiëntie van het nutriëntengebruik. Een betere benutting van op het bedrijf aanwezige nutriënten in bodem, gewasresten en organische meststoffen vergt veel kennis.

Voor het onderzoek is het een uitdaging om de kennis die op

proces- en plotniveau bekend is over biogeochemische nutriëntenkringlopen te operationaliseren en toepasbaar te maken op hogere aggregatieniveaus, dat wil zeggen daar waar kan worden gestuurd, namelijk op bedrijfsniveau, maar ook op regionaal niveau en nationaal niveau. Vereenvoudigde simulatiemodellen en diagnostische criteria en indicatoren dienen te worden ontwikkeld voor directe toepassing in de praktijk. Daarvoor biedt de huidige methodologie van de nutriëntenbalans, gekoppeld aan bodemvruchtbaarheidsindices, een goede basis.

Toepassing van emissie-arme toedieningstechnieken en het verbod op toediening in najaar en winter hebben de benutting van stikstof uit dierlijke mest reeds fors doen verbeteren. De benutting van fosfor uit dierlijke mest in het voorjaar kan echter beter. Door bijvoorbeeld de mest op maisland niet diep onder te ploegen maar in de nabijheid van de plantrij te plaatsen kunnen de maiswortels er veel eerder bijkomen. De eerste experimentele resultaten geven aan dat de startgroei van mais hierdoor wordt bevorderd (22).

Op termijn kan een knelpunt ontstaan bij de fosforvoorziening van intensief beweid grasland. Mestflatten bevatten namelijk vrijwel al het fosfor dat het graasvee uitscheidt, maar bedekken na één beweidingsseizoen minder dan 5 procent van het oppervlak. Mogelijk dat weideslepen daardoor in de toekomst weer meer zal worden toegepast; door weideslepen wordt de mest immers over een meer dan 5 keer zo'n groot oppervlak verdeeld.

Met betrekking tot de benutting van nutriënten uit gewasresten en nagewassen kan theoretisch nog winst worden gehaald. Opvallend is bijvoorbeeld dat van de circa 100 kg stikstof uit bietenblad slechts een kwart wordt benut door het volgende gewas. Ook bij veel groentegewassen blijven veel nutriënten in gewasresten op het land achter. Fundamenteel inzicht in de processen en in de mogelijkheden van sturing om de benutting te verbeteren is hier dringend gewenst. Tijdstip van

onderploegen van gewasresten, tijdstip en mate van grondbewerking en mate ontwatering beïnvloeden de snelheid waarmee nutriënten mineraliseren en opgenomen kunnen worden door het gewas (11,27). Over het effect van de afzonderlijke factoren is in kwalitatieve zin reeds veel bekend, maar niet in kwantitatieve zin en in samenhang met een gehele rotatie.

Naarmate een groter beroep moet worden gedaan op de interne kringloop, neemt het risico op opbrengstderving door nutriëntengebrek toe. Goed management kan dat risico beperken. Die kansen en risico's bepalen mede de mogelijkheden van de bedrijfsvoering om een rendabele productie te combineren met acceptabel lage verliezen. Mechanistische simulatiemodellen zijn bij uitstek geschikt om die risico's te kwantificeren. Die simulatiemodellen geven indirect ook de mogelijkheden en onmogelijkheden voor de bedrijfsvoering aan. Er zijn reeds verschillende modellen ontworpen om de boer bij de besluitvorming te kunnen ondersteunen, maar toepassing in de praktijk is om verschillende redenen nog beperkt, mede vanwege de beperkte betrouwbaarheid en toepasbaarheid.

In een samenwerkingsverband van NMI en de Vakgroepen Agrarische Bedrijfseconomie en Bodemkunde en Plantevoeding wordt momenteel gewerkt aan de kwantificering van onzekerheden en risico's van nutriëntenmanagement op een rundveebedrijf (27). Onzekerheid is daarbij gedefinieerd als de mogelijke variatie in de grootte van nutriëntenstromen en -verliezen ten gevolge van toekomstige, niet-bekende, variaties in bijvoorbeeld weersomstandigheden. Risico is gedefinieerd als de kans op een ongewenst effect. Deze analyses zijn van belang omdat op korte termijn veel frequenter dan nu op bedrijfsniveau afwegingen moeten worden gemaakt tussen opbrengstderving of overschrijding van verliesnormen met daaraan verbonden kosten. Het is nodig dat die afweging zo goed mogelijk kan worden gedaan, op basis van gekwantificeerde kansen en risico's. Daarvoor moeten de noodzakelijke instrumenten worden ontwikkeld. Bij toepassing in de praktijk moet ook rekening

gehouden worden met de risicoperceptie van de boer. Via analyses en modelberekeningen kunnen de consequenties daarvan in kaart worden gebracht.

### **Conclusies**

Het is duidelijk dat bemesting positieve en negatieve effecten teweegbrengt. In de publieke opinie overheerste het beeld van positieve effecten tot en met de jaren zeventig. Daarna kregen negatieve aspecten steeds meer aandacht, vooral in landen met intensieve landbouw. Het is ook duidelijk dat via goed bemesten de negatieve neveneffecten sterk kunnen worden beperkt. Daarom is het te wensen dat goed bemesten de waardering krijgt die kunst verdient.

In grote delen van de wereld is de voedselproductie te laag en is er behoefte aan kunstmest. Het is dringend gewenst dat de noodzakelijke intensivering van de landbouw en het toenemend kunstmestgebruik in die landen gepaard gaat met adequate kennisoverdracht over de kunst van goed bemesten. Daarmee kan worden bewerkstelligd dat in de publieke opinie in die landen het beeld van positieve effecten blijft overheersen.

De toekomst van de intensieve landbouw in Nederland is in toenemende mate afhankelijk van de snelheid waarmee de kwaliteit van het landbouwproduct wordt verhoogd en nutriëntenverliezen uit die landbouw worden gereduceerd tot een milieukundig acceptabel niveau. Landbouw bedrijven en bemesten zonder nutriëntenverliezen is onmogelijk. Wel mogelijk is een efficiënte en rendabele landbouw met acceptabel lage nutriëntenverliezen. Die landbouw is kennisintensief, dat wil zeggen maakt gebruik van kennis over nutriëntenkringlopen en over mechanismen om nutriëntenstromen te sturen. Het is de gezamenlijke taak van Landbouwuniversiteit, onderzoeksinstituten en praktijkonderzoek om daarvoor de instrumenten te ontwikkelen.

Het overheidsbeleid weergegeven in de *Integrale Notitie mest- en*

*ammoniakbeleid* (3) biedt de landbouw de ruimte om geleidelijk aan de efficiëntie van het nutriëntengebruik te verhogen en verliezen te verminderen. Bedrijven kunnen daardoor gedoseerd en op verschillende managementniveaus initiatieven nemen om te voldoen aan de doelstellingen voor het jaar 2008. De meest intensieve bedrijven zullen op strategisch niveau zwaarwegende beslissingen moeten nemen. Voor veel bedrijven volstaan maatregelen die voortvloeien uit beslissingen op tactische en operationele niveaus. Bij een verdere aanscherping van de verliesnormen, die gezien het milieu voor fosfaat zeker nodig is, al dan niet gebiedsgericht, neemt het beroep op kennis van goed bemesten maar ook de kans op opbrengstderving toe.

In specifieke sectoren, bij bepaalde teelten en in eutrofiëringsgevoelige gebieden zijn een rendabele productie en milieukundig acceptabele nutriëntenverliezen niet of nauwelijks te combineren. Dat geldt in het bijzonder voor de intensieve volleggrondsgroententeelt, waar veel groentegewassen met een ondiep wortelstelsel worden geoogst in een jong vegetatief stadium, en voor de melkveehouderij op zandgronden. In die gevallen zijn aanvullende gebiedsgerichte maatregelen nodig. Daarbij moet een keuze worden gemaakt tussen drie opties: óf acceptatie dat milieukwaliteitsdoelstellingen worden overschreden, óf financiële compensatie van de boer voor een lagere productie óf het treffen van aanvullende curatieve maatregelen.

Het is duidelijk dat ter overbrugging van de huidige kloof tussen landbouwkundige onvermijdbare en milieukundig acceptabele nutriëntenverliezen de land- en tuinbouw een forse stap tot vermindering van nutriëntenverliezen kan en moet zetten. Het overbruggen van deze kloof is een kunst op zich. Ik ben er van overtuigd dat toepassing van de kunst van goed bemesten een voorwaarde is om die kloof te overbruggen en er ook toe bijdraagt dat derving van gewasopbrengst en -kwaliteit tot een minimum kan worden beperkt.



## Tot slot

*Mijnheer de Rector Magnificus, dames en heren,*

Tot slot wil ik mijn dank uitspreken, ten eerste aan het bestuur van de Stichting NMI voor de steun die ze mij de afgelopen jaren hebben gegeven. Bijzonder veel dank gaat uit naar de voorzitter van NMI, Prof. Leen 't Mannetje en de voormalige NMI-directeur Willem Prins.

*Geachte leden van de Benoemingsadviescommissie, College van Bestuur,*

U dank ik voor het vertrouwen dat in mij is gesteld door mij voor te dragen als bijzonder hoogleraar in de Nutriëntenstromen en Bemesting.

*Geachte leden van de vakgroep Bodemkunde en Plantevoeding,*

U ben ik erkentelijk voor de wijze waarop u een plaatsje in uw midden voor de sectie NMI en voor mij hebt ingeruimd. Helaas kan ik niet aan alle activiteiten meedoen en bij alle belangrijke gebeurtenissen van de vakgroep aanwezig zijn. Een bijzonder woord van dank wil ik uitspreken tot Rian van Beusichem voor zijn steun en advies.

*Dames en heren van NMI,*

De warme collegialiteit die ik bij NMI heb ondervonden zal ik niet snel vergeten. Ik hoop dat er ook in de toekomst een intensieve interactie tussen ons zal blijven.

*Dames en heren van AB-DLO,*

U heeft mijn blik verder doen verbreden. Ik hoop door het werk aan de Landbouwniversiteit ook nieuwe impulsen te kunnen geven aan het AB-onderzoek naar 'bevordering van het plantaardig product in een schone omgeving'. Met enthousiasme wil ik me inzetten voor een verdergaande interactie tussen AB-DLO-Haren en Kenniscentrum Wageningen.

*Dames en heren studenten en promovendi,*

Nutriëntenstromen en bemesting zijn natuurlijke fenomenen en tevens een razend interessant maatschappelijk vraagstuk. Een combinatie van fundamentele kennis en praktisch inzicht kan bijdragen aan oplossing van het maatschappelijk vraagstuk. Ik hoop met u in vruchtbare samenwerking daaraan te werken.

*Dames en heren, geachte aanwezigen,*

Ik dank u voor uw aandacht.

#### **Literatuur**

1. Aarts, H.F.M., E.E. Biewinga, & H. van Kaulen (1992) Dairy farming systems based on efficiënt nutrient management. *Netherlands Journal of Agricultural Science* 40: 285-299.
2. Allison, F.E. (1955) The Enigma of Soil Nitrogen Balance Sheets. *Advances in Agronomy* 7: 213-250.
3. Anonymous (1995) Integrale Notitie mest- en ammoniakbeleid. Ministerie van Landbouw, Natuurbeheer en Visserij, Sdu-uitgeverij, Den Haag, 39 pp.
4. Bormann, F.H. & G.E. Likens (1967) Nutrient Cycling. *Science* 155: 424-429.
5. Brimblecombe, P. & A.Y. Lein (1989) Evolution of the Global Biogeochemical Sulphur Cycle. SCOPE report 39. John Wiley & Sons, Chichester, 241 pp.
6. Bussink, D.W. (1996) Relationships between ammonia volatilization and nitrogen fertilizer application rate, intake and excretion of herbage nitrogen by cattle on grazed swards. *Fertilizer Research* 18: 111-121.
7. Ceccotti, S.P. (1996) Plant nutrient sulphur - a review of nutrient balance, environmental impact and fertilizers. *Fertilizer Research* 43: 117-125.
8. Degens, E.T. (1989) Perspectives on Biogeochemistry. Springer-Verlag, Berlijn, 423 pp.
9. Diest, A. van (1967) Bemest men de plant of de grond? Openbare les, Landbouwwuniversiteit Wageningen.
10. Edwards, C.A., T.L. Grove, R.R. Harwood & C.J. Pierce Colfer (1993) The role of agroecology and integrated

- farming systems in agricultural sustainability. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 46: 99- 121.
11. Erp, P.J., A.P. Whitmore & P. Wiltng (1993) Mineralisatie van stikstof uit gewasresten suikerbieten na de oogst. *Meststoffen* 1993: 64-69.
  12. Garrett, M.K., C.J. Watson, C. Jordan, R.W.J. Steen & R.V. Smith (1992) The nitrogen economy of grazed grassland. *The Fertiliser Society Proceedings No 326*, 32 pp.
  13. Japenga, J. & P. Hoeksma (1991) Ontwikkeling analysemethoden dierlijke mest. AB-DLO/IMAG-DLO, Haren, 18 pp.
  14. Kim, K.R. & H. Craig (1993) Nitrogen-15 and Oxygen-18 characteristics of nitrous oxide: A global perspective. *Science* 262: 1855-1857.
  15. Koops, J.G., O. Oenema & M.L. van Beusichem 1996 Nitrogen losses through denitrification on grassland on peat soils (in review).
  16. Meer, H.G. van der (red.) (1991) Stikstofbenutting en - verliezen van gras- en maisland; stand van zaken in het onderzoek naar de stikstofproblematiek van gras- en maisland. Onderzoek inzake mest- en ammoniakproblematiek 10, Wageningen, 134 pp.
  17. Mosier, A., D. Schimel, D. Valentine, K. Bronston & W. Parton (1991) Methane and nitrous oxide fluxes in native, fertilized and cultivated grasslands. *Nature* 350: 330-332.
  18. Oenema, O. (1995) Ontwikkelingen in nutriëntenmanagement. *Meststoffen* 1995: 90-95.
  19. Pol, A. van den Pol - van Dasselaar & O. Oenema (1996) Effects of grassland management on the emission of methane from grassland on peat soils. In: Laiho, R., J. Laine & H. Vasander (eds.) *Northern Peatlands in Global Climatic Change*, The Academy of Finland, Helsinki, p. 148-153.
  20. Pothoven, R.P. (1995) Ontwikkelingen in bodemvruchtbaarheid en meststoffengebruik. *Meststoffen* 1995: 83-89.
  21. Schlesinger, W.H. (1991) *Biogeochemistry: An Analysis of Global Change*. Academic Press, San Diego, 443 pp.
  22. Schröder, J.J., L. ten Holte & G. Brouwer (1995)

- Rijenbemesting met drijfmest. AB-DLO-rapport 44, Wageningen, 46 pp.
23. Tiessen, H. (ed.) (1995) Phosphorus in the Global Environment; Transfers, Cycles and Management. SCOPE Report 54, John Wiley & Sons, 462 pp.
  24. Tunney, H., A. Breeuwsma, P. Withers & P. Ehler (1996) Phosphorus fertiliser strategies; present and future (in review).
  25. Turner, R.E. (1991) Fertilizer and climate change. *Nature* 349: 469-470.
  26. Velthof, G.L., A.B. Brader & O. Oenema (1996) Seasonal variations in nitrous oxide losses from managed grasslands in the Netherlands. *Plant & Soil* (in druk).
  27. Whitmore, A.P. & J.J.R. Groot 1994 The mineralization of N from finely and coarsely chopped crop residues: measurements and modelling. *European Journal of Agronomy* 3: 367-373.
  28. Wierda, C. & O. Oenema (1996). Onzekerheidsanalyse van nutriëntenmanagement van grasland. (in prep.).
  29. Yoshida, N. (1988) <sup>15</sup>N-depleted N<sub>2</sub>O as a product of nitrification. *Nature* 317: 349-350.