

39  
NNO2963  
71230

MAG  
1999-06-11 96633

574  
CA

gewas en milieu:  
een duurzame relatie?

door prof.dr.ir. J.H.J. Spiertz

andbouw universiteit

# **GEWAS EN MILIEU: een duurzame relatie?**

door prof. dr. ir. J.H.J. Spiertz



Inaugurale rede uitgesproken op 20 mei 1999.  
Landbouwniversiteit

## GEWAS EN MILIEU: een duurzame relatie?

*Mijnheer de Rector Magnificus, dames en heren,*

Agroproductiesystemen hebben in vele delen van Europa en ook in Nederland het landschap gevormd door een grote variatie in grondgebruik en benutting van mineralen. Een zorgvuldig en zuinig gebruik van mineralen was eeuwenlang een noodzakelijke voorwaarde om voldoende voedsel te produceren. De landbouwsystemen waren wel duurzaam, maar op een laag niveau van productiviteit per eenheid van oppervlakte en arbeidsinzet. Karakteristieke voorbeelden in Nederland zijn de essen met omliggende heidegronden en het Zuid-Limburgse lösslandschap.

**Essen** zijn bij uitstek een voorbeeld van landschapsvorming door aanwending van mest op de akkers ten koste van de natuurlijke bodemvruchtbaarheid van omliggende heidevelden. Overbegrazing en plaggen leidden ruim 100 jaar geleden tot grote zand-verstuivingen, die beteugeld werden door bebossing. Een uniek voorbeeld van niet duurzaam landgebruik. Door de aanwending van kunstmest kwam er een einde aan het uitmijnen van woeste gronden ten gunste van de akkerbouw.

Het unieke Zuid-Limburgse lösslandschap, met akkers op de plateaus, boomgaarden op de hellingen en grasland in de beekdalen, is een voorbeeld van een harmonisch ontstaan cultuurlandschap. Gewassen, aangepast aan de natuurlijke variatie in hydrologie, bodemgesteldheid en micro-klimaat, zorgden voor een relatief hoge productiviteit van deze gemengde bedrijfssystemen. De duurzaamheid van deze agro-productiesystemen werd bepaald door de instandhouding van mineralenstromen. Het vee was de spil van de mineralenkringloop. Gewasrotatie en

bemesting waren gebaseerd op een optimale benutting van schaarse voedingsstoffen. De instandhouding van de interne mineralenkringloop vroeg veel fysieke inspanning. De beschikbaarheid van goedkope arbeidskrachten bepaalde daarmee de economische duurzaamheid van deze ecologisch gevarieerde en gebalanceerde landbouwsystemen. De variatie aan gewassen, productstromen en bodemvruchtbaarheid droegen bij aan een grote diversiteit in flora en fauna.

### **Technologische evolutie in Nederland en Europa**

In Nederland en in vele andere delen van West Europa heeft in een periode van slechts een kwart eeuw een revolutionaire ontwikkeling in de landbouw plaatsgevonden. Deze ontwikkeling is sterk bepaald door het element stikstof. Stikstof is de bouwsteen voor aminozuren en eiwitten. Voor mensen en dieren zijn eiwitten onmisbaar in het dieet; voor planten is de beschikbaarheid van reactieve stikstofverbindingen, zoals nitraat en ammonium, nodig om aminozuren en eiwitten te kunnen synthetiseren. In de natuur is maar een zeer kleine fractie van alle stikstof in gebonden vorm aanwezig; de meeste stikstof komt als vrije stikstof in de lucht voor. De atmosfeer bevat 78 % stikstof, die alleen onder zeer specifieke omstandigheden reactief gebonden kan worden aan andere elementen. Planten kunnen in symbiose met wortelknolletjesbacteriën stikstof bij normale temperaturen binden uit de lucht. Dit proces is echter sterk afhankelijk van bodemvruchtbaarheid, vochtvoorziening en gewaseigenschappen. Stikstofbinding door vlinderbloemige gewassen kan meer dan 200 kg stikstof per ha bedragen onder gunstige omstandigheden; veelal is de hoeveel-

heid biologisch gebonden stikstof veel minder.

Belangrijke voedingsgewassen, zoals granen, zijn niet in staat luchtstikstof te binden. Bij rijst worden thans grote inspanningen gedaan om deze eigenschap door genetische modificatie in de plant in te bouwen.

Stikstofbinding vergt extra energie en zal in de regel leiden tot een lagere drogestofopbrengst.

Na een lange introductiefase nam het stikstofgebruik in de landbouw vanaf 1950 in de Westerse landen en vanaf 1960 in Azië exponentieel toe. Het doorbreken van de afhankelijkheid van organisch gebonden stikstof, bood de landbouw ongekende mogelijkheden om de voedselproductie te verhogen. Konden met de klassieke organische landbouwsystemen van een ha cultuurgrond ca 5 mensen gevoed worden, met het gebruik van kunstmest werd een veelvoud mogelijk. Zonder kunstmeststikstof was het niet mogelijk geweest voldoende voedsel te produceren in de tweede helft van deze eeuw (Smil, 1997). Door de intensivering van de productie nam het gebruik van stikstofmeststoffen sterk toe (Galloway, 1998); over een periode van ca 30 jaren, van 1960 tot 1990, is het gebruik van kunstmeststikstof wereldwijd lineair toegenomen van ca 10 tot 80 miljoen ton per jaar. Een omslag van een structureel stikstoftekort naar een overmaat aan kunstmeststikstof dreigt. Projecties naar de toekomst zijn onzeker; in gebieden met een hoog potentieel productieniveau zal het gebruik van stikstof verder toenemen.

Een hogere productiviteit per ha en per arbeidsuur gaf de stimulans om het biologisch productiepotentieel van plant en dier beter te benutten. Het verkleinen van de

kloof tussen actuele en potentiële productie kreeg voor de belangrijke voedselgewassen een extra impuls door het streven van de EU naar zelfvoorziening in Europa. In de **akkerbouw** werden met meer stikstof en de inzet van een breder spectrum van gewasbeschermingsmiddelen de opbrengsten van gewassen sterk verhoogd (Spiertz et al., 1992). Dit gold in het bijzonder voor wintertarwe, waar de combinatie van gedeelde stikstofgiften, halmverkorting en een chemische bescherming van het gewas tegen schimmelziekten en insecten leidde tot hoge, maar ook stabiele opbrengsten (Dilz et al., 1982; Spiertz & de Vos, 1983). Door de vele onzekerheden ten aanzien van de beschikbaarheid van stikstof in de bodem werd er zeker bij de stikstofbemesting vaak voor een gift gekozen, die afgestemd was op een maximale productie. Lage kosten van kunstmeststikstof maken het economisch aantrekkelijk om extra opbrengstrisico's af te dekken.

Een grotere aanvoer dan afvoer van mineralen leidt zowel op perceels- als bedrijfsniveau tot mineralenoverschotten. De mineralenoverschotten op praktijkbedrijven kunnen tussen jaren sterk variëren. Schröder en collegae (1996) vonden dat zelfs op geïntegreerde akkerbouwbedrijven de kritische waarde van 70 kg stikstof per ha in de bovenste 60 cm van de bodem na de oogst in de jaren 1990 tot en met 1992 in ca 80 % van de gevallen werd overschreden.

In de akkerbouw- en vollegrondsgroentesector zorgen gewassen, die veel stikstof achterlaten in het loof, oogstresten of de bodem, voor de meeste problemen. Het betreft met name aardappelen, suikerbieten en diverse koolsoorten. Ook gewassen met een beperkt

wortelstelsel of een zeer grote stikstofbehoefte, zoals prei en spinazie, kunnen veel stikstof na de oogst achterlaten met het risico van uit- en of afspoeling. Bij de teelt van bloembollen op lichte gronden, zijn er ook risico's op ongewenste verliezen van mineralen. Maatregelen om met zgn. vanggewassen een deel van de stikstof in de bodem vast te leggen en uitspoeling gedurende de periode met neerslagoverschot te voorkomen hebben op lichte gronden breed ingang gevonden.

Het gebruik van externe inputs, in het bijzonder krachtvoer en kunstmest, nam in de bodemgebonden veehouderij sterker toe dan in de akkerbouw. Dit had als gevolg een forse stijging van de productiviteit - meer gras, maïs en melk per ha - maar ook een grotere belasting van het milieu. De stikstofbenutting in **graasveehouderij-systemen** is een goede indicator voor de productie-efficiëntie. Ketelaars en Van der Ven (1992) geven aan, dat het stikstofgebruik in de periode van 1950 tot 1985 gestegen is van 2,2 tot 6,4 kg stikstof per kg stikstof geproduceerd als vlees of melk. Een aanzienlijke daling van de stikstofbenuttings-efficiëntie; als gevolg hiervan zijn de stikstofverliezen in de graasveehouderij sterk toegenomen. Uit milieukundige overwegingen zijn er veel inspanningen gedaan om de efficiëntie te verhogen en verliezen te minimaliseren. Door Ketelaars (AB-DLO) is in samenwerking met het bedrijfsleven aangetoond, dat door bio-raffinage van gras een breed spectrum van producten te winnen is zonder tussenkomst van de grazende koe. Hoogwaardige eiwitfracties kunnen bestemd worden voor humane voeding of gespecialiseerd veevoer. Het voeren van koeien wordt maatwerk, waarbij een overmaat aan eiwit kan worden

vermeden. Milieutechnisch kan de benutting van het hele gewas leiden tot een betere beheersing van mineralenstromen in bodemgebonden agrosystemen.

### **Van productie naar milieudoelstellingen**

Bij een te grote aanvoer van mineralen in relatie tot de opname en benutting door gewassen wordt de efficiëntie van de benutting van mineralen lager en nemen de emissies naar de milieucompartimenten bodem, water en lucht toe. De stikstofverliezen betreffen ammoniakvervluchtiging, nitraatuitspoeling en denitrificatie. Tijdens het groeiseizoen is er een grote variatie in de mineralisatie van organisch gebonden stikstof in de bodem en in de behoefte van het gewas, waardoor er een grote complexiteit is in het sturen van het aanbod en het beperken van verliezen (Stockdale et al., 1997). De noodzaak om de bemesting beter af te stemmen op de normen voor de kwaliteit van grond- en oppervlaktewater, bodem en lucht heeft in het wetenschappelijk onderzoek veel aandacht gekregen (Oenema, 1996). De zorg voor een schoon milieu heeft geleid tot meer strategisch onderzoek naar een betere benutting van stikstof en fosfaat en een beperking van de verliezen in alle schakels van het bodem - plant - dier systeem.

Het tot stand komen van het proefbedrijf "De Marke" voor onderzoek naar een rendabele melkveehouderij binnen strenge milieueisen op zandgrond staat model voor een geïntegreerde aanpak door het fundamenteel-strategische en het praktijkgerichte onderzoek van het mineralenprobleem op bedrijfsniveau (Aarts et al., 1992). Dit gebeurt in nauwe interactie met de praktijk en



het beleid. In de melkveehouderij is de laatste 10 jaren veel bereikt om mineralenoverschotten terug te dringen met behoud van het rendement.

Door de Landbouwniversiteit is er op de A.P.

Minderhoudhoeve in Flevoland een onderzoek gestart naar de benuttingsefficiëntie van mineralen in gemengde bedrijfssystemen. Daarbij is gekozen voor de ontwikkeling van een biologisch en een geïntegreerd systeem. De modelverkenningen en de eerste resultaten laten zien, dat voor stikstof een grote efficiëntie-verbetering, van ca 20 naar 50 %, te bereiken is bij een optimale verhouding tussen arealen akkerland en grasland en een gerichte beheersing van mineralenstromen (Lantinga et al., 1998)

Het Ministerie van Landbouw, Natuurbeheer en Visserij heeft vele maatregelen genomen om de hoeveelheid mest op bouw- en grasland te beperken en het tijdstip en de wijze van de aanwending beter af te stemmen op de behoeften en de benutting door de gewassen.

Aanvankelijk lag het accent sterk op middelvoorschriften om verliezen naar het milieu te beperken; meer recent is het zwaartepunt verschoven naar doelvoorschriften. Het doel is de beperking van overschotten aan mineralen tot een niveau, waarbij het milieu niet veruuld wordt en de landbouw de noodzakelijke bodemvruchtbaarheid op peil kan houden. Maatregelen van de overheid hebben geleid tot een aanmerkelijke inperking van het stikstof- en het fosfaatoverschot gedurende de afgelopen 10 jaren. In het **Mineralenaangiftesysteem (MINAS)** wordt de aan- en afvoer van mineralen op bedrijfsniveau geregistreerd. De norm voor het niet belaste stikstofoverschot ligt thans op 300 kg N per ha voor grasland en zal in 2008 max. 180 kg N per ha

bedragen. Voor bouwland bedraagt de norm nu 175 kg N per ha en zal in 2008 max. 100 kg N per ha bedragen. De norm voor het fosfaatoverschot bedraagt thans 17 kg P per ha en zal in 2008 nog slechts 9 kg P per ha mogen bedragen. Naast de verliesnormen voor stikstof en fosfaat zal de overheid een maximale grens van 2,5 GVE per ha in 2008 introduceren.

Uit het voorgaande blijkt dat de milieuproblematiek aangepakt moet worden in de context van de aard en omvang van de mineralenstromen in de betreffende productiesectoren. De milieukundige randvoorwaarden worden bepaald door biofysische en chemische bodemeigenschappen, maar vooral ook door de ecologische en hydrologische karakteristieken van landschappen. Meervoudig duurzaam landgebruik beoogt een schone landbouw te combineren met andere functies in het landelijk gebied. Dit streefdoel heeft een enorme impuls gekregen door het interdepartementaal onderzoeksprogramma Duurzame Technologische Ontwikkeling (DTO). Uitgangspunt was een drastische vermindering van de milieubelasting met een factor 20 en daarnaast het ontwikkelen van grond-gebruiksfuncties, die de werkgelegenheid en het inkomen in het gebied waarborgen. In het project Duurzaam Landgebruik is er door onderzoekers reeds vroegtijdig ingespeeld op de thans actuele beleidsdoelstelling van het Ministerie van Landbouw, Natuurbeheer en Visserij: het behoud van een **vitaal platteland**.

Voor wetenschappers uit meerdere disciplines ligt er de uitdaging om voor landschappelijk karakteristieke gebieden tot ecologisch en economisch duurzame gebruiksvormen te komen. De methodiekontwikkeling

moet verder tot wasdom komen; regionale "pilot"-projecten waarin betrokkenen en onderzoekinstellingen deelnemen, bieden daar mogelijkheden toe. Een eerste inventarisatie van kansrijke gebieden voor multifunctioneel grondgebruik in Nederland is gemaakt door Staring Centrum en AB-DLO (Hermans & Vereijken, 1998). Het samengaan van meerdere functies in een gebied geeft ook een nieuwe referentiekader voor wetenschappen, die gericht zijn op de ontwikkeling van duurzame plantaardige productiesystemen.

Inmiddels beschikt Nederland over een grote expertise op het gebied van proces- en systeemonderzoek om te komen tot duurzaam landgebruik en een efficiënte productie van voedsel en groene grondstoffen (Kropff et al., 1997). Deze kennis zal zeer goed toepasbaar zijn elders in de wereld, waar de problemen met betrekking tot voedselvoorziening meer nijpend zijn.

### **Voedselvoorziening en duurzaam landgebruik: een mondiale problematiek**

Het belang van de plantaardige productie voor de wereldvoedselvoorziening kan met een aantal kengetallen geïllustreerd worden. Wereldwijd wordt ca 84 % van de verteerbare energie in het humane dieet verkregen uit plantaardige producten; voor eiwitten is het aandeel 65 %. De granen leveren ca 55 % van de verteerbare drogestof; dit betreft met name rijst, tarwe en maïs (Evans, 1999). Dierlijke producten dekken 15 % van het dieet op basis van drogestof; het aandeel in de eiwitvoorziening bedraagt 35 %. Deze dierlijke producten worden weer in aanzienlijke mate geproduceerd met granen en graan-

afval, zoals soja en maïsschroot. Evans schat, dat er met de huidige technologie reeds 10 miljard mensen op aarde gevoed kunnen worden als we voor 100 % overschakelen op een vegetarisch menu. Bij dergelijke schattingen behoren kritische kanttekeningen geplaatst te worden, omdat de valorisatie van plantaardig afval door de veehouderij tot hoogwaardig voedsel veelal buiten beschouwing blijft. Zonder grazers zouden grote oppervlakten grasland in berggebieden en savannen niet efficiënt voor voedselproductie benut worden.

De uitdagingen voor het landbouwkundig onderzoek om te werken aan mondiale voedselzekerheid en een duurzaam gebruik van natuurlijke hulpbronnen zijn zeer groot. De bevolking groeit de komende 20 jaren van 6 naar 8 miljard mensen; een bevolkingstoename die bijna geheel in ontwikkelingslanden plaatsvindt. Dit betreft vooral landen in Azië en Afrika.

Naast China zal ook India op korte termijn meer dan een miljard inwoners tellen. Beide landen tonen een snelle technologische ontwikkeling en een groeiende koopkracht bij belangrijke delen van de bevolking. De nieuwe welvaart wordt allereerst besteed aan een rijker menu. In China betekent dit meer vlees en in het overwegend vegetarisch India meer groenten en fruit. Het voedselprobleem is dus niet alleen een vraagstuk van meer monden, maar ook van een ander voedselpakket. Beide ontwikkelingen doen de vraag naar plantaardige producten sterk stijgen. Kan deze groeiende behoefte door een meer efficiënte en gediversificeerde landbouw in de betreffende landen zelf gedekt worden of moet er een groter beroep op de wereldmarkt gedaan worden? Uit recente gegevens van de OECD blijkt dat China zijn

behoefte aan meer veevoer in belangrijke mate dekt door een explosieve toename van soja-importen; voor de humane consumptie van granen, tarwe en rijst, neemt de zelfvoorzieningsgraad zelfs toe. In West Azië en Noordelijk Afrika zijn de voedselimporten nu reeds gigantisch van omvang; de graanimporten in deze overwegend semi-aride gebieden bedragen ca 650 miljoen ton per jaar. Visueel kan dit uitgebeeld worden als de hoeveelheid graan, die vervoerd wordt door een goederentrein van 16.000 km lengte. Door de sterke bevolkingsgroei en de afnemende beschikbaarheid van water voor landbouw zal volgens studies van internationale onderzoeksinstituten, met name het IFPRI, ICARDA en IWMI, de import van granen in 2020 verdubbeld zijn.

Vanuit Wageningen is aan de regionale en mondiale problematiek van duurzaam landgebruik en voedselvoorziening reeds meer dan 25 jaren aandacht gegeven. Penning de Vries en collegae (1997) concluderen op basis van hun modelberekeningen, dat zowel regionaal als wereldwijd voedselzekerheid potentieel mogelijk is. Terecht wordt de kanttekening gemaakt dat er grote verschillen zijn tussen geografische regio's in beschikbaarheid van natuurlijke hulpbronnen en dat het realiseren van een grotere voedselzekerheid een belangrijke sociaal-economische dimensie heeft. De toenemende vraag naar voedsel in ontwikkelingslanden vraagt een nieuwe aanpak, waarbij verdere intensivering van de productie samengaat met een duurzaam gebruik van de natuurlijke hulpbronnen.

Wat zijn de opties om meer voedsel te produceren?

**Optie 1: het areaal aan cultuurgrond uitbreiden.** Dit was in grote gebieden het geval tot ca 1960. Sindsdien is er door urbanisatie, industrialisatie, erosie en verzilting meer cultuurgrond uit productie gegaan dan er is ontgonnen. De beschikbare oppervlakte cultuurgrond is gedaald van ca 0,45 naar 0,25 ha per persoon en daalt nog steeds. Er moet dus meer voedsel geproduceerd worden op een afnemend areaal landbouwgrond.

Mogelijkheden tot areaaluitbreiding zijn er regionaal, met name in Latijns Amerika en Zuidelijk Afrika. In deze gebieden is niet het landoppervlak beperkend, maar de bodemvruchtbaarheid en het gebrek aan kunstmest (Van Keulen & Breman, 1990). Elders is grond echter zo schaars dat bossen worden opgeofferd voor het grazen van vee en het in cultuur brengen van plantages. Om de voor de biodiversiteit waardevolle gebieden te behouden is een intensiever gebruik van landbouwgronden onontkoombaar. Extensivering van inputs mag dan voor gebieden met een verzadigde markt, bv. Europa, een partiële oplossing zijn; wereldwijd is deze optie niet handhaafbaar.

**Optie 2: het verhogen van de productie per ha door een hogere productiviteit van gewassen en/of de teelt van meerdere gewassen in een seizoen.** In grote gebieden is er de mogelijkheid en noodzaak om twee of drie gewassen per jaar te telen. Deze optie wordt het meest kansrijk geacht om aan de groeiende vraag naar voedsel en plantaardige grondstoffen voor non-food toepassingen en bio-energie te voldoen.

In landen met een groot voedseltekort, werden in de jaren '60 hoogproductieve tarwe- en rijstrassen geïntroduceerd. Uit de statistieken van de FAO blijkt, dat over

de periode 1965 - 1998 de opbrengsten van rijst, maïs en tarwe sterk gestegen zijn en gewassen voor droge gebieden, zoals sorghum en millet, maar weinig opbrengstvermeerdering laten zien. Vooral in landbouwsystemen met relatief gunstige groei-omstandigheden konden de gewasopbrengsten meer dan verdubbelen. De nieuwe variëteiten maakten bij een aangepast management ten aanzien van bemesting, irrigatie, onkruid- en ziektenbestrijding een trendbreuk in de opbrengstverbetering mogelijk. Internationale kennisnetwerken hebben een grote versnelling gebracht in de toepassing van onderzoeksresultaten in de praktijk. Vanwege de urgentie om meer voedsel te produceren en de aard van de nieuwe teelttechnologie waren de vernieuwingen "technology-driven" met een sterke "top-down" benadering vanuit het onderzoek. Deze ontwikkeling heeft internationaal naam gemaakt als "**green revolution**". Er worden thans grote inspanningen gedaan om met moderne biotechnologische technieken maïs- en rijstvariëteiten te ontwikkelen, die een 25 % hogere opbrengstpotentie hebben. Bij de teelt van dergelijke topassen zal het nodig zijn een goed inzicht te hebben in het complex van opbrengstbeperkende en opbrengst-reducerende factoren; een geïntegreerd management van water- en nutriëntenvoorziening en van onkruid-, plaagen ziektenbeheersing zal nodig zijn om met een efficiënte benutting van de inputs tot een goed resultaat te komen. De aanpak, waarbij een verdere intensivering van de productie samengaat met een duurzaam gebruik van de natuurlijke hulpbronnen wordt wel aanbevolen als de "evergreen revolution" (Swaminathan, 1996).

## **Water, gewas en milieu**

Waterkwaliteit en - kwantiteit worden centrale thema's op de agenda van politici en wetenschappers in het volgende millennium. Water wordt de meest limiterende natuurlijke hulpbron voor voedselproductie en voor humane consumptie in de volgende eeuw. Kan er een na de groene revolutie een witte revolutie in de voedselproductie tot stand komen? De World Water Council brengt de problematiek wereldwijd onder de aandacht van het publiek. In Wageningen is tijdens de Internationale Landbouwdag 1996, georganiseerd door het KLV en het KIT, onder de titel van "WITTE REVOLUTIE; naar efficiënter watergebruik" aandacht besteed aan deze belangrijke problematiek. De komende tijd zullen er door onderzoekers en politici nog vele bijeenkomsten besteed worden aan de oplossingsrichtingen. Nederland ambieert een prominente rol te spelen in dit debat.

Wat zijn de gewaskundige mogelijkheden om een efficiënter watergebruik te realiseren?

De hoeveelheid water, die gewassen verdampen is gekoppeld aan de snelheid van het fotosyntheseprocess en daarmee aan de groei van het gewas (Schapendonk, 1996) . De transpiratie-efficiëntie (aantal grammen drogestof per liter waterverbruik) bedraagt voor aardappelen tussen de 7,5 en 10,5 g drogestof per kg water tijdens het groeiseizoen. Bij een aardappelopbrengst van ca 65 ton per ha wordt ongeveer 300 mm water verdampt. Zelfs in het relatief regenrijke Nederland vormt de waterbeschikbaarheid vaak een beperkende factor voor groei, opbrengst en kwaliteit van gewassen. Het neerslagtekort gedurende het groeiseizoen bedraagt voor



de meeste gewassen meer dan 100 mm.

Droogtegevoelige gronden kunnen dit verschil niet uit de bodemvoorraad leveren. Opname van water uit de bodem onder droge omstandigheden is sterk afhankelijk van de beworteling, in het bijzonder de lengte en de verdeling van de wortels in de bodem.

Productie-ecologisch zijn er mogelijkheden om droogteschade te vermijden door:

a. het vergroten van de **tolerantie of resistentie-eigenschappen** door fysiologische aanpassing, zoals:

- het verkleinen van de lichtonderschepping door verwelking of rollen van bladeren als de verdamping groter wordt dan de waterbeschikbaarheid; dit fenomeen treedt vaak midden op de dag op. Dit zijn zgn. siësta-planten; het productieverlies midden op de dag wordt dan gecompenseerd door meer productie als de vochthuishouding meer optimaal is.

- de fysiologische regulatie van de verdamping door het gedeeltelijk sluiten van de huidmondjes; de transpiratie wordt dan meer beperkt dan de fotosynthese. Dit fenomeen is bekend bij een groot aantal C4-planten, zoals maïs. Deze planten kunnen als stress-bestendig worden getypeerd.

b. het vergroten van de wateropname door het aanboren van meer vochthoudende bodemlagen door een **diepere beworteling**, bv. bij zonnebloemen, of het doorboren van storende lagen met een penwortel, bv. bij luzerne en sommige Sorghum-variëteiten.

c. door de teeltperiode aan te passen aan de waterbeschikbaarheid; dit kan door de teeltperiode aan te passen aan de neerslagverdeling, bv. wintergewassen in het Mediterrane gebied, of door **teeltvervroeging**; een

klassiek voorbeeld in Nederland is de teelt van rogge op lichte gronden.

Water- en nutriëntenhuishouding zijn in de plantaardige productie onderling afhankelijk; bij watertekort en een goede nutriëntenvoorziening verhoogt beregening of irrigatie de opbrengst en daarmee de nutriëntenefficiëntie. In geïrrigeerde systemen met een ongelimiteerde watervoorziening draagt een optimale stikstofbemesting en gewasbescherming bij tot een verhoging van de efficiëntie in watergebruik. De **efficiëntie voor water- en nutriëntenbenutting** vertoont grote verschillen afhankelijk van het systeem. Voor geïrrigeerde rijst kan het waterverbruik 3 tot 4000 liter per kg drogestof bedragen, terwijl er voor de transpiratie slechts ca 300 liter per kg drogestof nodig is. Dit toont aan, dat er niet volstaan kan worden met een analyse van de efficiëntie op het gewasniveau, maar dat het hele systeem in beschouwing genomen dient te worden op het niveau waarin input - output relaties te kwantificeren zijn. Voor water is dat veelal de "catchment area" en niet het perceel of individuele bedrijf.

Om een forse besparing op het watergebruik te bereiken zal dan niet volstaan kunnen worden met een verfijning van het gewasmanagement, maar zal naar alternatieven op systeemniveau gezocht moeten worden. Bij rijst is het bekend dat het meeste water verloren gaat door evaporatie en percolatie. Een van de opties is om gewassen met een geringere hoeveelheid water gedurende een kortere tijd te irrigeren (Bouman, pers. med.). De effecten daarvan op de gewasontwikkeling en gewasgroei en daarmee op de benutting van stikstof door het gewas vergen nog nader onderzoek. Door natte en droge rijst-

bouw af te wisselen zal er ook een groot effect zijn op de organische stof en mineralenhuishouding. Gecombineerd bodemkundig en gewaskundig onderzoek kan leiden tot een zuiniger gebruik van water en meststoffen in deze geïrrigeerde systemen.

### **Werkvelden voor gewasecologisch onderzoek**

In de laatste decade van deze eeuw is de noodzaak van een multidisciplinaire, meer holistische aanpak van problemen steeds duidelijker geworden (Bouma, 1999). In tegenstelling tot het verleden kan de gewasecologie niet meer een alleenstaande positie innemen; zelfs het vervullen van een brugfunctie tussen meerdere disciplines is niet meer vanzelfsprekend. Problemen met betrekking tot nutriënten- en stofstromen, in het bijzonder water, vragen om een systeemaanpak op meerdere aggregatieniveaus: gewas - bedrijf - regio.

Meer dan in het verleden is daarbij een systeemgerichte benadering van belang, waarbij kennis van meerdere vakgebieden bij elkaar gebracht wordt om tot integrale oplossingen te komen. Het vakgebied van de productie-ecologie beschikt met simulatie en systeemanalyse over onderzoeksmethoden om deze problemen multidisciplinair aan te pakken en oplossingen aan te reiken. Het grondlegend werk om plantenfysiologische, bodemkundige en meteorologische processen te integreren op gewasniveau is in de jaren '60 verricht onder de inspirerende leiding van C.T. de Wit bij het voormalig Instituut voor Biologisch en Scheikundig Onderzoek (IBS) en vervolgens verder uitgebouwd door de Gideonsbende op het gebied van simulatie en gewasgroei: de vakgroep Theoretische Teeltkunde. De inaugurale rede van

De Wit, Goudriaan en Rabbinge geven de ontwikkelingen in het modelleren goed weer (de Wit, 1968; Rabbinge, 1985; Goudriaan, 1993). De Wit legde de theoretische basis voor de systeembenadering en het verband met het agrobiologisch onderzoek; Goudriaan gaf een natuurwetenschappelijke verdieping aan het koppelen van processen op verschillende aggregatieniveaus en Rabbinge legde de bruggen met de gewasbescherming en landgebruiksstudies. Een nieuwe generatie productie-ecologen heeft de systeemkennis in grote internationale projecten, zoals SARP, PPS en thans SysNet, samen met onderzoekers in ontwikkelingslanden toegepast op onderzoeksvraagstukken op het gebied van agro-productie en duurzaam landgebruik (Kropff et al. 1994). Op deze wijze is Wageningen uitgegroeid tot een expertisecentrum op het gebied van simulatie en systeemanalyse met wereldwijde erkenning.

Nu de financiering van het experimenteel fundamenteel-strategisch onderzoek op het gebied van plantaardige productie en milieu ("natural resource management") internationaal sterk onder druk staat, dreigt er ook een risico voor de experimentele toetsing van modeluitkomsten. Onderzoeksinspanningen verschuiven van de analyse van wetenschappelijke hypothesen naar de synthese van bestaande kennis tot marktbaar producten. Witte vlekken in basisleggende kennis, bijvoorbeeld op het gebied van adaptatie van gewassen aan een beperkt aanbod van water en nutriënten, vergen nauwgezet experimenteel onderzoek. Een combinatie van experimenteel onderzoek onder veld- en gecontroleerde omstandigheden, bijvoorbeeld in het Wageningen Rhizolab, biedt op een unieke en effectieve wijze de

mogelijkheid om de noodzakelijke gegevens voor ontwikkeling en toetsing van modellen te vergaren. Thans worden deze geavanceerde onderzoeksfaciliteiten niet of onderbenut door het gebrek aan financiering.

Gecombineerd experimenteel en modelonderzoek gericht op "resource-use efficiency" van schaarse groei-factoren, met name water, is onmisbaar. Modellen voor optimalisering en toetsing van duurzaamheid van productiesystemen worden te vaak gevoed met "expert knowledge". Dit is een snelle en goedkope werkwijze, maar vervangt niet de noodzaak voor experimentele verificatie.

De laatste jaren zijn nieuwe toepassingsvelden voor het gewasecologisch onderzoek tot ontwikkeling gekomen, die specifieke eisen stellen aan het experimenteel en theoretisch onderzoek. Een viertal onderzoeksvelden kunnen daarbij onderscheiden worden:

a. **Ideotypen:** het identificeren van planteigenschappen van belang voor de aangepastheid van gewassen aan agro-ecologische omstandigheden (daglengte, temperatuur, etc.) en stress-omstandigheden, zoals: koude, droogte, hitte, etc.

Een goed voorbeeld is de betere aangepastheid van het C4-gewas maïs aan de lagere temperaturen op de Noordelijke breedtegraden en de teelt van aardappelen in verschillende agro-ecologische zones (Struik et al., 1997)

Een grote inspanning wordt er thans door het IRRI geleverd om voor verschillende ecosystemen hoog-productieve rijstrassen te ontwikkelen op basis van eigenschappen, die met modelonderzoek verkend zijn.

In samenwerking met het WARDA wordt door de leerstoelgroep Gewas- en Onkruidecologie gewerkt aan de ontwikkeling van rijstrassen met een groter onkruidonderdrukkend vermogen.

**b. Prototyperen:** het definiëren en ontwikkelen van teeltsystemen, die voldoen aan specifieke eisen, zoals duurzaamheid. Vooral de ecologische duurzaamheid heeft een grote complexiteit vanwege de vele biotische en abiotische interacties van belang voor opbrengstvorming en kwaliteit van het geogste product.

Door Vereijken & Kropff (1995) zijn op dit gebied grote vorderingen gemaakt door een koppeling van theoretisch en experimenteel onderzoek bij de ontwikkeling en toetsing van prototypen; het experimenteel onderzoek vindt zowel plaats op proefbedrijven, als in samenwerking met praktijkbedrijven. De combinatie van experimenteel en modelonderzoek met participatief onderzoek door boeren bevordert de kennisdoorstroming en -ontwikkeling. In dergelijke kennisclusters zijn de lijnen zeer kort en kan er interactief gewerkt worden aan duurzame, rendabele productiesystemen.

**c. Adviseren (Decision Support):** het betreft kennisintensief management van gewassen, waarbij de dosering van water, nutriënten en biociden nauwkeurig is afgestemd op de groeiprocessen en op de gezondheid van het gewas. Het intelligent toepassen van kennis in een geïntegreerd management van gewassen draagt bij aan een efficiënte benutting van zonlicht, water en voedingsstoffen. Veel aandacht gaat thans uit naar het verfijnen van de stikstofbemesting bij granen op basis van de variatie in bodemvruchtbaarheid. Voor Nederland zijn er nog meer perspectieven bij het terugdringen van het gebruik van bestrijdingsmiddelen en de sturing van

de productkwaliteit.

De beste perspectieven zijn er, wanneer de advisering wordt gericht op het geheel van strategische en tactische **managementbeslissingen** binnen een bedrijf.

Strategische keuzen betreffen de gewasrotatie, bemesting en gewasbescherming. Daarbinnen kunnen tactische keuzes gemaakt worden ten aanzien van het tijdstip en hoeveelheid van het toedienen van meststoffen en bestrijdingsmiddelen. Daarbij spelen goede weersgegevens en waarnemingen van de boer of teeltadviseurs aan bodem en gewas een onmisbare rol.

De ontwikkelingen in de informatie- en communicatietechnologieën maakt het mogelijk om historische, actuele en voorspelde gegevens vast te leggen en te gebruiken in zogenaamde **zelflerende systemen**. Door Haverkort en Van Haren (1999) wordt deze nieuwe aanpak gebruikt bij de ondersteuning van beslissingen voor de teelt van aardappelen. Centraal bij deze aanpak staat het gewasgroeimodel. Gegevens over relevante omgevingsfactoren en teeltgrepen worden opgeslagen in een database; deze gegevens worden vervolgens gebruikt om tot een perceelspecifiek advies te komen. Dit biedt de teler de mogelijkheid om op een goed gefundeerd advies tot specifieke keuzes te komen in het gewasmanagement.

**d. Evalueren (Technology Assessment):** het analyseren van de mogelijke gevolgen van de introductie van nieuwe genotypen en van teelttechnologieën op "performance", productkwaliteit en duurzaamheid van het agro-ecosysteem.

Bij de introductie van nieuwe genotypen is het van belang, dat de juiste teeltcondities gecreëerd worden om de beoogde eigenschappen tot expressie te brengen. Evaluatie van genotypen onder sub-optimale omstandig-

heden wat betreft bemesting en watervoorziening leidt tot verkeerde keuzes van rassen en teeltmethoden. Meer kritisch zijn de effecten op de stabiliteit van ecosystemen en op de veiligheid van het voedsel. De consument stelt steeds hogere eisen aan de kwaliteit van het productieproces en aan de neveneffecten op milieu en natuur.

Een van de meest in de publieke aandacht staande vraagstukken is het gebruik van genetisch gemodificeerde organismen (g.g.o.). De gewasecologie kan een belangrijke bijdrage leveren aan het verkennen van mogelijke risico's bij de introductie van g.g.o. voor het agroecosysteem en de natuur. Keurmerken voor ecologisch veilige productiewijzen en etikettering om de herkomst van producten aan te geven bieden informatie aan de consument om eigen keuzes te maken.

### **Perspectieven voor gewas- en productie-ecologisch onderzoek**

De kerntaak van het vakgebied gewasecologie met bijzondere aandacht voor nutriënten- en stofstromen ligt dan ook op het ontwerpen en testen van schone plantaardige productiesystemen en op het beheer van natuurlijke hulpbronnen. Het zwaartepunt bij het gewasecologisch onderzoek lag traditioneel op de analyse van effecten van omgevingsfactoren op groei en ontwikkeling in relatie tot het producerend vermogen van gewassen. Gewasecologisch onderzoek zal in de toekomst gericht zijn op de complexe vragen met betrekking tot een duurzame voedselproductie en een multifunctioneel gebruik van de groene ruimte.

Het gewasecologisch onderzoek zal de komende jaren



een belangrijke bijdrage moeten leveren aan de twee pijlers van een ecologisch en economisch duurzame plantaardige productie:

1. Het beter benutten van het **genetisch-biologisch** opbrengstvermogen van gewassen.
2. Het verbeteren van de effectiviteit en de efficiëntie, waarmee de **natuurlijke hulpbronnen en externe inputs** in agro-productiesystemen gebruikt worden.

Ook bij het beter beheersen van de abiotische en biotische processen, die ten grondslag liggen aan een verdere verhoging van de productiviteit van gewassen en aan een duurzaam gebruik van bodem en water in kwetsbare agro-ecosystemen speelt de gewasecologie een vitale rol. Daarbij wordt een bijdrage geleverd aan de maatschappelijk behoeften ten aanzien van voldoende en veilig voedsel, groene grondstoffenvoorziening, een schoon milieu en een grote diversiteit aan natuur en landschappen. Fundamenteel-strategisch gewasecologisch onderzoek zal meer dan ooit nodig zijn voor het oplossen van de problemen, die op het gebied van de ecologisering en de technologische innovatie voortkomen uit de praktijk en/of het beleid.

Binnen mijn leeropdracht wil ik in het bijzonder aandacht geven aan:

- a. Het analyseren van de **fysiologische en morfologische respons van gewassen** op een meer gelimiteerd aanbod van water en stikstof en het integreren van deze kennis tot bouwstenen voor kennisintensief management van gewassen, waarbij de dosering van water en meststoffen nauwkeurig is afgestemd op de behoeften van het gewas.
- b. Het ontwikkelen van **ecologische gefundeerde agro-systemen**, die voldoen aan eisen van duurzaamheid en

aan meervoudige functies in het landelijk gebied. Daarbij zal zowel gestreefd worden naar een efficiëntieverbetering voor het gebruik van water en mineralen, maar ook naar het combineren van productiedoelstellingen met andere maatschappelijke doelstellingen, zoals natuurontwikkeling en het winnen van grondwater.

c. Het meer volledig benutten van de **biomassa en inhoudstoffen** van gewassen om daarmee een zuiniger gebruik van water, voedingsstoffen en energie te realiseren.

Een duurzame relatie tussen gewas en milieu is mogelijk wanneer er voldaan wordt aan de vereisten om niet vervangbare natuurlijke hulpbronnen in stand te houden (Lewandowski et al.,1999). Dit is een zeer moeilijke opgave voor de ontwikkelingslanden gelet op de kloof tussen de groeiende vraag naar meer voedsel en de schaarser wordende natuurlijke hulpbronnen. De ontwikkelde landen beschikken over voldoende middelen en kennis om invulling te geven aan duurzaamheidscriteria. De behoeften van de maatschappij aan andere gebruiksfuncties van het landelijk gebied zullen daar een grotere invloed hebben dan de grenzen van een duurzaam landgebruik.

Om te komen tot duurzame plantaardige productiesystemen is het noodzakelijk, dat oplossingsrichtingen voor de langere termijn gedefinieerd worden door een sterke wisselwerking tussen wetenschap, beleid en praktijk. In het verleden is de ontwikkeling van nieuwe teelt- en bedrijfssystemen gescheiden verlopen van andere functies in het landelijk gebied. Dit heeft geleid tot grote belangentegenstellingen en een slecht imago

van sommige productiesectoren in het landelijk gebied. In de toekomst zal de ontwikkeling en toetsing van ecologisch en technologisch gemoderniseerde bedrijfs-systemen beter samen dienen te gaan met doelstellingen ten aanzien van milieukundig verantwoord landgebruik op gebiedsniveau. Vanuit Wageningen Universiteit en Researchcentrum wil ik gaarne mijn bijdrage leveren aan nieuwe wegen en oplossingen voor een landbouw met perspectief in Nederland, Europa en in ontwikkelingslanden.

*Geachte voorzitter en leden van de Raad van Bestuur,*  
U dank ik voor het vertrouwen in mij en voor de benoeming tot bijzonder hoogleraar bij de leerstoelgroep Gewas- en Onkruidecologie. In deze deeltijdfunctie zal mijn aandacht in het bijzonder uitgaan naar nutriënten- en stofstromen in plantaardige productiesystemen. Uw besluit om een DLO-manager tot hoogleraar te benoemen in een turbulente fase van veranderingen bij de Landbouwuniversiteit vereist moed en beleid. Ik reken het tot mijn maatschappelijke plicht om mij de komende 5 jaren volop in te zetten voor de academische positie van Wageningen UR.

*Hooggeleerde Jacobsen, Kropff en Rabbinge; beste Evert, Martin en Rudy,*  
Namens het Departement Plantwetenschappen hebben jullie niet alleen het groene licht gegeven voor deze bijzondere leerstoel, maar mij ook bijzonder hartelijk in jullie kring opgenomen. Vele jaren heb ik met jullie vruchtbaar samengewerkt als directeur van CABO en AB-DLO. Ik hoop nu in een andere partnerrelatie deze samenwerking verder uit te bouwen.

Door de leerstoelgroep Gewas- en Onkruidecologie i.o., wordt onder de enthousiaste leiding van Martin Kropff, nu reeds nauw samengewerkt met andere leerstoelgroepen binnen en buiten het departement. Een bijzondere uitdaging zie ik in de samenwerking met de leerstoelgroepen Plantaardige Productiesystemen en Biologische Bedrijfssystemen.

*Hooggeleerde Bouma, Oenema en Smaling; beste Johan, Oene en Eric,*

Op de grensvlakken van bodem, plant en land liggen de uitdagingen voor innovatieve wetenschap; jullie werkwijze is voor mij zeer inspirerend. Geen verkokering binnen disciplines, maar een multi-disciplinaire aanpak met een sterke internationale oriëntatie. Met voldoening kijk terug op de samenwerking binnen AB-DLO en de Onderzoekschool Productie-Ecologie; ik reken op jullie steun in deze nieuwe functie.

*Collega's van de voormalige vakgroep Agronomie;*  
Aan de Haarweg heb ik de eerste 10 jaren van mijn wetenschappelijk carrière met veel wetenschappelijke vrijheid mogen werken onder leiding van de hoogleraren 't Hart, Vervelde en Kupers. Ik heb toen geleerd, dat fundamenteel-strategisch onderzoek goed overdraagbaar is naar de praktijk. Onderzoek in het fytotron en in het veld zonder financiële zorgen en een intensieve collegiale samenwerking tussen graanonderzoekers waren karakteristiek voor die periode. Een romantisch plaatje vergeleken met de huidige verzakelijking van de wetenschap. De latere fase van fusie en concentratie heb ik van grotere afstand gevolgd. De stichters van de vakgroep Agronomie waren de hoogleraren Fresco, 't Mannetje en

Struik. Jammer, dat de bundeling van expertise in de agronomie binnen Wageningen geen kans heeft gekregen tot wasdom te komen.

*Collega's van de voormalige vakgroep Theoretische Productie-Ecologie,*

In 1968 heb ik als jong Wagenings ingenieur colleges gevolgd bij de buitengewoon hoogleraar Cees de Wit; vanaf 1978 heb ik als hoofd van de afdeling Gewaskunde met deze buitengewone wetenschapper en persoon intensief contacten onderhouden. Cees de Wit en Loydd Evans hebben mij gemotiveerd om een wetenschappelijke carrière op te pakken; dit virus ben ik ook niet kwijtgeraakt als manager. Het is voor mij een groot voorrecht om deel te kunnen uitmaken van een "TPE-club" waar nog steeds de kwaliteit en creativiteit hoog in het vaandel staan. Helaas worden jullie nu ook geconfronteerd met de onzekerheden van een ingrijpende reorganisatie. Ik vertrouw er op dat op korte termijn twee vitale leerstoelgroepen bemensd worden.

*Collega's van AB-DLO en het voormalige CABO,*

Het is de tweede keer in mijn carrière, dat ik van afstand het werk van CABO en AB-DLO kan waarnemen. Jullie inzet, creativiteit en kwaliteit van werken na ingrijpende reorganisaties dwingt bij mij diep respect af. Mijn verbondenheid met jullie is nog steeds intens; de unieke identiteit en sfeer mag bij de opschaling naar weer een grotere eenheid niet verloren gaan.

De invulling van deze bijzondere leerstoel was niet mogelijk geweest, als ik niet wetenschappelijk gevoed was door velen van jullie. Goed onderzoek wordt gecombineerd met probleemgericht werken en een grote

betrokkenheid bij de doelgroepen in Nederland en in ontwikkelingslanden. Ik zal mij inzetten voor een vruchtbare samenwerking binnen de Onderzoekschool Productie-Ecologie.

*Dames en heren promovendi en studenten,*

Het wordt weer boeiend in het nieuwe Millennium; de landbouw in Nederland zal zijn transformatie afronden en het imago zal verbeteren. Voor gewaskundigen met een internationale en multidisciplinaire oriëntatie zullen er goede perspectieven zijn. Ik hoop de goede contacten met vele generaties ARVENSE studenten in het verleden ook met een nieuwe generatie vorm te kunnen geven.

*Dames en heren, geachte aanwezigen,*

Ik dank u voor uw aanwezigheid en uw aandacht

## **Literatuur**

- Aarts, H.F.M., E.E. Biewinga & H.van Keulen, 1992. Dairy farming systems based on efficient nutrient management. *Neth. J. Agric. Sci.* 40: 285-299
- Bouma, J., 1999. De bodem in het ruimtelijk beleid. *Diëtrede Landbouwniversiteit, Wageningen*
- Dilz, K., A. Darwinkel, R. Boon & R.M.J. Verstraete, 1982. *Intensive wheat production as related to nitrogen fertilisation, crop protection and soil nitrogen*. The Fertilizer Society, No 211, 93-124
- Evans, L.T., 1999. Step towards feeding the Ten Billion. *Plant Prod. Sci.* 2: 3-9
- Galloway, J.N., 1998. The global nitrogen cycle: changes and consequences. In: *Nitrogen, the Confer-N-s*. Eds. K.W. van der Hoek et al., Elsevier, Amsterdam, pp. 15-26
- Goudriaan, J., 1993. Model, schaal en aggregatieniveau. *Inaugurale rede, Landbouwniversiteit Wageningen*
- Haverkort, A.J. & R.J.F. van Haren, 1998. Innovatie van de aardappelproductieketen. *Jaarverslag AB-DLO*, pp.57-60
- Hermans, C.M.L. & P.H. Vereijken, 1998. Multifunctionele Landbouw; ruimtelijke verkenning van de landelijke behoefte op gemeenteniveau. *Rapport 643.1. DLO-Staring Centrum, Wageningen*, 79 pp

Ketelaars, J.J.M.H. & G.W.J. van de Ven, 1992. Stikstofbenutting en - verliezen in productiegrasland. In: Stikstofstromen in agro-ecosystemen. Eds. H.G. van der Meer & J.H.J. Spiertz, Agrobiologische Thema's 6, CABO - DLO, Wageningen, pp. 33-48

Keulen, H. van & H. Breman, 1990. Agricultural development in the West African Sahelian region: a cure against land hunger? *Agric. Ecosyst. Environ.* 32: 177-197

Kropff, M.J.; F.W.T. Penning de Vries & P.S. Teng, 1994. Capacity building and human resource development for applying systems analysis in rice research. In: Opportunities, use and transfer of systems research methods in agriculture to developing countries (Eds.: P. Goldworthy & F.W.T. Penning de Vries). Kluwer Academic Publ., The Netherlands.

Kropff, M.J., R.C. Muchow, R. Rabbinge & P.K. Aggarwal, 1997. Limits to intensive agricultural systems and opportunities for sustainable agricultural development. In: *Intensive Sugarcane Production: meeting the challenges beyond 2000*. Eds B.A. Keating & J.R. Wilson, CAB International, Wallingford, UK, pp. 17-35

Lantinga, E.A. & G.J.M. Oomen, 1998. The Minderhoudhoeve project: Development of an integrated and an ecological mixed farming system. In: *Mixed Farming Systems in Europe*. Eds H. van Keulen, E.A. Lantinga & H.H. van Laar. Workshop Proceedings, 25-28 May 1998, Dronten, The Netherlands. APMinderhoudhoeve-reeks nr. 2, pp. 115-118.



Lewandowski, I., M. Härdtlein & M. Kaltschmitt, 1999. Sustainable Crop Production: definition and methodological approach for assessing and implementing sustainability. *Crop Sci.* 39: 184-193

Penning de Vries, F.W.T., R. Rabbinge & J.J.R. Groot, 1997. Potential and attainable food production and food security in different regions. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. B* 352: 917-928

Oenema, O., 1996. De kunst van goed bemesten. Inaugurale rede, Landbouwniversiteit Wageningen

Rabbinge, R., 1985. De brugfunctie van de gewasecologie. Inaugurale rede, Landbouwniversiteit Wageningen

Schapendonk, A.H.C.M., 1996. Marges voor watergebruiksefficiëntie bij veldgewassen. In: Verslag Internationale Landbouwdag KLV en KIT "Witte Revolutie; naar efficiënter watergebruik", pp. 17-28

Schröder, J.J., P. van Asperen, G.J.M. van Dongen & F.G. Wijnands, 1996. Nutrient surpluses on integrated arable farms. *European Journal of Agronomy*: 181-191

Smil, V., 1997. Global population and the nitrogen cycle. *Scientific American*, July 1997, pp.58-63

Struik, P.C., M.F. Askew, A. Sonnino, D.K.L. Mackerron, U. Bang, E. Ritter, O.J.H. Statham, M.A. Kirkham & V. Umaerus, 1997. Forty years of potato research: highlights, achievements and prospects. *Potato Research* 40: 5-18

Spiertz, J.H.J. & N.M. de Vos, 1983. Agronomical and physiological aspects of the role of nitrogen in yield formation of cereals. *Plant and Soil* 75: 379-391

Spiertz, J.H.J., H.D.J. van Heemst & H. van Keulen, 1992. Field crop systems in North-Western Europe. In: *Ecosystems of the world; field crop ecosystems*. Ed. C.J. Pearson, Elsevier, Amsterdam, Chapter 15, pp. 357 - 371

Stockdale, E.A., J.L. Gaunt & J. Vos, 1997. Soil-plant nitrogen dynamics: what concepts are required? *European Journal of Agronomy* 7: 145-159

Swaminathan, M.S., 1996. Towards an Ever-green revolution. *Proceedings 2nd Int. Crop Sci. Congress, New Delhi, INDIA. Special Issue: Crop Productivity and Sustainability - Shaping the future*, pp. 29-35

Vereijken, P.H., 1992. A methodic way to more sustainable farming systems. *Neth. J. Agric. Sci.* 40: 209-223

Vereijken, P.H. & M.J. Kropff, 1995. Prototypering van ecologische bedrijfs- en teeltsystemen met een nieuwe balans tussen theoretisch en praktisch onderzoek. In: *Hoe ecologisch kan de landbouw worden?* Eds A.J. Haverkort & P.A. van der Werff, Studiedag KLV, AB-DLO en PELUW, Wageningen 21 November 1995. AB-DLO Thema's 3, pp. 95-109.

Wit, C.T. de, 1968. *Theorie en model. Inaugurale rede, Landbouwhogeschool Wageningen*