# Ontwikkelingen in wetenschap en technologie

## Plantaardige productiesystemen en productie-ecologie

Dit essay werd opgesteld in opdracht van de Nationale Raad voor Landbouwkundig Onderzoek door:

*Prof.Dr.Ir. R. Rabbinge, LU-Vakgroep Theoretische Productie-ecologie*

*Nationale Raad voor Landbouwkundig Onderzoek*
Postbus 20401
2500 EK Den Haag
tel.: 070 378 56 53

ISBN: 90 - 5059 - 049 - 7
Overname van tekstdelen is toegestaan, mits met bronvermelding.
NRLO-rapport nr. 97/37, Den Haag, december 1997

# Ten Geleide

Met de verkenningen “Ontwikkelingen in Wetenschap en Technologie” wil de NRLO een beeld krijgen en bieden van de dynamiek in wetenschap en technologie. Het gaat daarbij niet alleen om het identificeren van kansrijke ontwikkelingen in de “klassieke” aan de agrosector gerelateerde wetenschappen, maar ook om kansrijke ontwikkelingen daarbuiten. De vraag, die daar telkens bij wordt gesteld, is wat deze dynamiek zou kunnen betekenen voor de agrosector en/of de ontwikkeling van het landelijk gebied.
In een tweede fase zal worden verkend in hoeverre kansrijke W&T-gebieden aandacht krijgen binnen het kennissysteem voor landbouw en groene ruimte in Nederland en daarbuiten.
In aansluiting op de analyses zullen door de NRLO voorstellen worden uitgewerkt ter versterking van de aansluiting tussen het kennissysteem voor de agrosector en de groene ruimte en de internationale wetenschappelijke en technologische ontwikkelingen.
De rapporten en essays die in het kader van de verkenningen “Ontwikkelingen in Wetenschap en Technologie” worden opgesteld, zullen door de NRLO worden gepubliceerd en vervolgens worden geïntegreerd in een einddocument over strategische wetenschaps- en technologiegebieden.

In dit essay staan de uitdagingen op het interdisciplinaire vakgebied van de productie-ecologie centraal. Vanuit een historisch perspectief worden de revolutionaire ontwikkelingen in de landbouw (de ‘groene revoluties’) geschetst. De grote afstand, die nog steeds bestaat tussen potentie en realisatie van producties, maakt nieuwe grote doorbraken mogelijk. De moleculaire biologie biedt daarvoor nieuwe kansen. De productie-ecologie maakt ook gebruik van ecologische kennis bij het beheer van agrosystemen. De volgende belangrijke agro-revolutie zal liggen op het terrein van de ecologische gewasbescherming en de onkruidkunde en de integratie daarvan binnen de productie-ecologie.

*Dr.Ir. A.P. Verkaik,*
*Directeur Bureau NRLO.*

# Inhoudsopgave


Ten geleide i

Inleiding 1

1. Ontwikkelingen op het gebied van de landbouwkundige productie 3

2. Natuurwetenschappelijke basis van de landbouwwetenschappen 7

3. Oude concepten, nieuwe perspectieven 9

4. De HRH-benadering van de productie-ecologie 13

5. Opties voor verbetering van de potentiële opbrengst, via planten-fysiologische inzichten 15

6. Opties voor beheersing van de groeikortende factoren met behulp van productie-ecologische benaderingen 19

7. Landgebruik en schaalniveaus 21

8. Landbouw als bron voor de fijnchemische industrie 23

9. Ecologische revoluties 25

10. Bedreigingen 27

11. Conclusies 29

Literatuurlijst 31

Summary 33

# Inleiding

In het kader van een NRLO-verkenning naar toekomstige prioriteiten en elementen voor de onderzoeksagenda van de 21e eeuw hebben een aantal personen een uitnodiging ontvangen om een essay te schrijven over het vakgebied waar ze zich op bewegen, met de uitdrukkelijke opdracht om daarbij autonome ontwikkelingen die zich op het betrokken vakgebied voordoen als uitgangspunt te nemen.
Dit essay gaat over de toekomstige ontwikkelingen, mogelijkheden en kansen op het interdisciplinaire vakgebied van de Productie-ecologie. De ontwikkeling van dit nog jonge wetenschapsgebied als brug tussen de basiswetenschappen enerzijds, en de veelal op kundes, ervaring en empirie gebaseerde landbouwwetenschappen anderzijds, is de laatste decennia zeer voorspoedig geweest. Dat zal hierna blijken. Na een korte beschrijving van de stormachtige ontwikkeling van de landbouw en de productiviteit wordt ingegaan op de verschillende kansen die er in de nabije toekomst nog liggen.

# 1. Ontwikkelingen op het gebied van de landbouwkundige productie

In deze eeuw werd de wereldbevolking vervijfvoudigd en de wereldvoedselproductie verzesvoudigd. De sterke vergroting van de productie werd mogelijk gemaakt door groene revoluties. Kennis en inzichten uit verschillende vakgebieden en het benutten van externe hulpmiddelen hebben geleid tot deze zeer ingrijpende veranderingen in de voedselproductie en de landbouw. De veranderingen die zich in de geïndustrialiseerde wereld hebben voorgedaan, hebben geleid tot een drastische verschuiving in de karakteristieken van die primaire productie. In nog geen honderd jaar vonden veel grotere veranderingen plaats dan in honderden jaren daarvoor.

In de Middeleeuwen was de productiviteit per ha zodanig dat zo'n 80 procent van de beroepsbevolking zijn bestaan in de landbouw moest vinden. De logistieke problemen die in die tijd bestonden om de weinige steden te voeden waren groot en alleen via geavanceerde transportsystemen kon een land als Nederland in de 15e en 16e eeuw zich zo'n sterke positie verwerven. De voedselvoorziening berustte in die tijd, en in feite nu nog, op de productie van granen. Dat was het hoofdbestanddeel van het dieet en het zorgde voor zo'n 90 procent van de totale voeding. Het opbrengstniveau zat op circa 500-700 kg per ha; 200 kg was nodig voor zaaizaad, zodat slechts zo'n 300-500 kg kon worden gebruikt voor brood, pap en bier. Sedert de middeleeuwen steeg de opbrengst per ha tot zo'n 1000-1500 kg per ha aan het begin van deze eeuw. In deze eeuw vond echter stijging tot zo'n 8000 kg per ha plaats, arbeidsbehoefte daalde van zo'n 400 uren per ha tarwe naar ongeveer 10 uren per ha, en gebruik van externe inputs, veelal fossiele energie nam sterk toe. Tegenintuïtief nam ook de efficiëntie van het gebruik van externe productiefactoren toe, zowel per eenheid van water als per eenheid van nutriënten.

Dat laatste is geen continue stijging geweest; er was zelfs in verschillende periodes sprake van een verminderde efficiëntie, doch over deze eeuw

gezien is er sprake van toename van de efficiëntie. Daardoor werd de landbouw niet alleen productiever, maar ook veel doelmatiger en doeltreffender.

Landbouw en voedselvoorziening, die in de pre-geïndustrialiseerde wereld van de 19e eeuw nog voor meer dan 50 procent de arbeidsbehoefte bepaalde, vindt nu plaats met minder dan 5 procent van de beroepsbevolking in dit deel van de wereld. Dergelijke veranderingen in productie en productiewijzen verliepen ogenschijnlijk geleidelijk, doch vormen in historisch perspectief een trendbreuk. Daarom worden ze geduid als groene revoluties.

De eerste groene revolutie deed zich voor aan het begin van deze eeuw in de geïndustrialiseerde delen van de wereld toen kunstmest en mechanisatie op grote schaal werden toegepast en een drastische verhoging van grond- en arbeidsproductiviteit bewerkstelligden. De tweede groene revolutie voltrok zich na de tweede wereldoorlog als gevolg van de combinatie van nieuwe rassen met een hogere harvest-index, beter water- en plantenvoedingsstoffen-management en goede gewasbescherming. Beide groene revoluties voltrokken zich in het geïndustrialiseerde Westen.

*Groene revoluties voltrokken zich in de 20$^{e}$ eeuw op verschillende plaatsen.*

Een derde groene revolutie, die de eerste en tweede combineerde, deed zich aan het eind van de 60-er en begin 70-er jaren voor in verschillende ontwikkelingslanden, zoals China, India en Indonesië. Binnen 10 jaar steeg de productiviteitstoename van zo'n 4-10 kg per ha per jaar tot zo'n 100-150 kg per ha per jaar. Dankzij die groene revoluties bleven structurele voedseltekorten ondanks de sterk groeiende bevolking uit. In de komende decennia moet deze impuls worden herhaald.
De snelle verandering in het karakter van een samenleving van een door landbouw gedomineerde samenleving (>70% van de werkgelegenheid), via een samenleving met een mengsel van landbouw, secundaire sector, naar een volledig door tertiarie en quartaire sector gedomineerde samenleving (>70% van de werkgelegenheid) deed zich voor in het rijke Westen en voltrekt zich nu in een ijltempo in andere delen van de wereld. Die ontwikkeling is voor sommigen bedreigend, voor anderen fantastisch, doch voor het merendeel van de leden van de samenleving vanzelfsprekend. Het is zowel een kans als een bedreiging, maar in het licht van

de economische ontwikkeling onvermijdbaar. De uitdagingen voor de wereldvoedselvoorziening zijn daarbij gigantisch.

Bevolkingsgroei en grote veranderingen in dieet hebben ingrijpende gevolgen voor een verdere groei van de benodigde voedselproductie in de komende tijd: 2 à 3 keer zoveel in 40 jaar met minder land, minder water, minder energie en veel minder arbeid. Deze grote veranderingen zullen zich met name in de ontwikkelingslanden moeten voltrekken. De uitdaging aan de productie-ecoloog is dan bij te dragen aan een sterke toename van de voedselvoorziening op een zodanige wijze dat landgebruik en benutting van de natuurlijke hulpbronnen duurzaam kan zijn. Daartoe bestaan mogelijkheden (WRR, 1994).

*Wereldvoedselvoorziening kan blijvend worden verzekerd, doch dat vergt ingrijpende technologische veranderingen op veel plaatsen.*

# 2. Natuurwetenschappelijke basis van de landbouw-wetenschappen

*Mendel en Liebig legden de grondslag voor de landbouw-wetenschap.*

Twee fundamenteel vernieuwende concepten, door wetenschappers ontwikkeld in de 19e eeuw, legden de wetenschappelijke basis voor de huidige landbouwwetenschappen. Mendel introduceerde de wetenschappelijke basis voor de erfelijkheidsleer en daarmee voor de plantenveredeling, Liebig toonde de chemische basis voor de plantenvoeding. Op grond van die inzichten kon de groei van planten worden geanalyseerd en van een stevige biologische basis worden voorzien, die vervolgens kon worden benut. Tijdens de twintigste eeuw vond een verdere verdieping van deze nieuwe inzichten plaats en zijn als gevolg van nieuwe technologie de mogelijkheden om fijnregeling van de planteneigenschappen te bewerkstelligen drastisch toegenomen.
In het essay over moleculaire biologie en biotechnologie wordt daar nader op ingegaan (Van Kammen, 1997). Het benutten van deze inzichten en kennis vergt een omvangrijk opschaal- en implementatietraject. Daar speelt de productie-ecologie een zeer belangrijke rol.

Eeuwenlang is vooruitgang vrijwel uitsluitend via de weg van het uitproberen en leren gerealiseerd. Fenomenologische kennis van ontwikkeling en geometrie van gewassen speelde slechts een ondergeschikte rol. Het benutten van basisinzichten en de toepassing daarvan in de teelt en productie van gewassen vergt specifieke expertise en ervaring. Veel inzichten over de primaire productieprocessen kunnen alleen worden benut als de geëigende agronomische maatregelen kunnen worden ontwikkeld. Kennis van de verdelingsprocessen in gewassen en optimalisatie van de agronomische maatregelen om tot een zo goed mogelijke harvest-index te komen, is eerst na een combinatie van inzicht en empirie gelukt. Zo werd veel vooruitgang geboekt in de teelt en veredeling van gewassen.

De sterk empirische basis van de landbouwwetenschappen en het trial-and-error-karakter heeft pas in deze eeuw steeds meer plaatsgemaakt voor een op kennis en inzichten gebaseerde beïnvloeding en manipulatie van de verschillende factoren die groei en productie bepalen. Daarmee ontwikkelt de agronomie of landbouwwetenschap zich steeds meer in de richting van productie-ecologie. Productie-ecologie is een integrerende wetenschap die de kennis en inzichten uit de basiswetenschappen, die fysisch, chemisch of moleculair biologisch van karakter zijn, integreert en benut voor het begrijpen, ontwikkelen, verbeteren en ontwerpen van levende productiesystemen die doelmatig en doeltreffend tegemoet komen aan opties van duurzaamheid in maatschappelijke, ecologische en economische zin. Vanuit de inzichten van de basisprocessen wordt de brug geslagen naar gewas- en dierproductie, worden technieken geïntegreerd en wordt de basis gelegd voor duurzaam landgebruik.

# 3. Oude concepten, nieuwe perspectieven

Oude concepten die in de landbouwwetenschappen werden gehanteerd kunnen nu plaats maken voor perspectieven ontleend aan de productie-ecologie. Hiervan vier voorbeelden:

*Van trial and error naar op inzicht en verklaring gebaseerde ingrepen.*

1. De trial-en-error-benadering op systeemniveau (dosis-effectproeven op systeemniveaus, monofactoriële en multifactoriële proeven) wordt vernieuwd tot een op inzichten gebaseerde beïnvloeding en interventie. Ideotypen van planten kunnen nu worden ontwikkeld op basis van een kwantitatieve analyse van de relatieve bijdrage die verschillende categorieën van groei definiërende factoren (temperatuur, straling, $CO_2$ en planteneigenschappen) leveren, of en hoe die kunnen worden beïnvloed. Inkomende straling en temperatuur kunnen, behoudens zeer kleine arealen in kassen, niet worden beïnvloed, doch de geometrische, fysiologische, fenologische en optische eigenschappen van planten wel, zodat de benutting van natuurlijke hulpbronnen kan worden geoptimaliseerd. Zo kon worden aangetoond dat de regelmechanismen van de korrelvulling in rijst en tarwe en de omvang van het phloeëmvatenstelsel kunnen worden beïnvloed (Sheehy, 1996; Bindraban, 1997), en dat daarmee een verhoging van de potentiële opbrengst met zo'n 15 procent mogelijk is zonder dat dit gepaard gaat met meer inzet van productiefactoren. Op basis van inzichten over de mechanismen achter strekkingsgroei worden rijstrassen ontwikkeld met behulp van moderne biotechnologische technieken, en gentransplantatie, waarmee verdubbeling van de opbrengst in "flood prone rice" kon worden gerealiseerd.

2. De in de landbouwwetenschappen veel gehanteerde wet van de verminderde meeropbrengst is van toepassing als alle andere groeifactoren gelijk blijven. In de praktijk blijkt dat vaak anders te zijn. Door gelijktijdige beïnvloeding van verschillende factoren kan de respons van ieder van de afzonderlijke factoren worden verbeterd. De verbetering van de waterbenutting bijvoorbeeld gaat meestal samen met verbetering van de stikstofefficiëntie. De oorzaak voor een dergelijke synergie is gelegen in de fysiologische en fenologische

basisprocessen. Meer inzicht in die mechanismen kan leiden tot een sterke efficiëntieverbetering. Zo wordt het traditionele concept van productiefuncties uit de landbouwwetenschap vervangen door zogenaamde target-oriented input van productiefactoren (Van Ittersum en Rabbinge, 1997).
Het te bereiken opbrengstniveau wordt als ingang gebruikt voor de daarvan af te leiden benodigde inzet van hulpmiddelen, zoals water en/of nutriënten en de omgekeerde traditionele weg, waarbij van de inputs naar de outputs wordt geredeneerd, wordt niet gevolgd.
Een dergelijke benadering vergt goede kennis van het al naar gelang de omstandigheden en doeleinden af te leiden optimale productieniveau (Van Ittersum en Rabbinge, 1997). Daartoe is een onderscheid in potentieel en bereikbaar opbrengstniveau van belang (Rabbinge, 1993). Het optimale opbrengstniveau is al naar gelang de groeicondities bepaald door klimaat, bodem en gewaseigenschappen anders, in milieutechnische en teelttechnische zin is daar een goede synthese mogelijk en daarom goed een oordeel over te geven (Rabbinge, 1986). Milieutechnisch en teelttechnisch optimum vallen niet altijd samen. Daarom zijn al te generieke uitspraken hierover gevaarlijk. Het blijkt dat bij hogere opbrengstniveaus, zeker bij goede groeiomstandigheden de efficiëntie van aanwending van de hulpmiddelen het hoogst is (De Wit, 1992). Daarmee is er een bonus om naar hogere opbrengstniveaus te streven. Dat geldt niet ongelimiteerd, maar in vrijwel 95 procent van de landbouwsystemen is de afstand tussen potentieel en actueel niveau nog zo enorm dat een verdere productiviteitsverhoging zowel teelttechnisch als milieutechnisch gewenst is.

3. In de landbouwwereld werd heterogeniteit doorgaans als zeer hinderlijk ervaren en gaf aanleiding tot een gemiddeld gesproken te grote inzet van productiemiddelen. Via fijnregeling en precisietechniek kan dat worden voorkomen en kan van die ruimtelijke heterogeniteit gebruik worden gemaakt. Vooral de beïnvloeding van groeikortende factoren (ziekten, plagen, onkruiden) kan veel preciezer plaatsvinden. Heterogeniteit wordt mogelijk als gevolg van de flexibele respons door antagonisten, parasieten en predatoren die wordt bevorderd door heterogeniteit een gunstige factor in plaats van een zeer nadelige factor te laten zijn (van een liability naar een asset). Door gebruik te maken van GIS-technieken, nauwkeurige

inzichten over de wijze waarop verschillende factoren elkaar beïnvloeden, kan aan de verdere ecologisering van de primaire productie een belangrijke bijdrage worden geleverd.
In de precisielandbouw wordt van vele precisie-plaatsbepalingssystemen gebruik gemaakt. Voorts wordt de interactie tussen boer en teelttechnisch adviseur die de laatste 10 jaar verminderd was, door andere communicatiemogelijkheden verbeterd. Ook hier zijn het weer de verbeterde inzichten in de bodem-gewasinteracties en spatio-temporele ontwikkelingen die het mogelijk maken dat vooruitgang wordt geboekt bij fijnregeling op perceelniveau.
Dat geldt voor de grootschalige akkerbouw zoals in de VS, maar in niet mindere mate voor de kleinschalige landbouw zoals in Nederland, of de laag technologische landbouw zoals die in vele ontwikkelingslanden met name in aride gebieden plaatsvindt (Bouma, 1997; Van Duivenbooden, 1996).

4. Vrijwel alle landbouwwetenschap speelde zich af op gewasniveau. De gewasfysiologische en gewasecologische inzichten vormden de basis voor verbeteringen en fijnregeling op dat niveau. Er komen als gevolg van die betere inzichten over verschillende verschijnselen op lagere integratieniveaus steeds meer mogelijkheden om ook op bedrijfs- en regionaal niveau productiesystemen te ontwerpen en landgebruik te optimaliseren. Daartoe moet worden voortgebouwd op de detailinzichten op basisniveau over de groei en ontwikkeling van de gewassen onder verschillende omstandigheden en kan gebruik worden gemaakt van de zogenaamde target-oriented approach. Optimalisatie van de inzet van de verschillende productiefactoren op de hogere integratieniveaus is nu mogelijk geworden, omdat de target-oriented approach de inzet dicteert en de geografische, bodemkundige en klimaatinformatie met behulp van de nieuwe informatiesystemen onmiddellijk beschikbaar maakt voor de gebruiker. Zowel bij de strategische, de tactische als bij de operationele beslissingen kan daarvan gebruik worden gemaakt en kan grote vooruitgang worden geboekt in productiviteit en doelmatigheid, en doeltreffendheid van productiemiddelen.

Bovenstaande illustreert de evolutie van de landbouwwetenschappen van een empirische of systeemniveau functionerende wetenschap naar een op

begrijpen, analyse van basisprocessen gebaseerde synthetiserende wetenschap, de productie-ecologie.

# 4. De HRH-benadering van de productie-ecologie

*In de productie-ecologie gaan de reductionalistische op verklaring gerichte benadering goed samen met de synthetiserende ontwerpende benadering.*

Productie-ecologie maakt gebruik van de reductionistische benadering van de disciplinaire wetenschapper en benut diens inzichten bij de synthese en integratie op hogere integratieniveaus. Voor die integratie wordt gebruikgemaakt van de systeembenadering. Daar zijn recent grote vooruitgangen geboekt. Naast de traditionele simulatiemodellen, die vooral werden benut voor het verwerven van inzichten op systeemniveau, zijn er nu ook veel modellen die worden benut bij het nemen van operationele, tactische en strategische beslissingen. De informatietechnologie heeft het mogelijk gemaakt simulatiemodellen die 10 jaar geleden nog main frame computers vergden, nu op pc's te draaien en in real time beslissingen te ondersteunen. De operationele analyse heeft technieken afgeleverd die strategische verkenningen op alle integratieniveaus mogelijk maken. Het doordenken van mogelijkheden en alternatieven zal daarmee een standaard benadering worden in de voortgaande verbetering van de productiviteit en productieprocessen in agro-ecosystemen.

In de productie-ecologie wordt doorgaans gebruikgemaakt van de zogenaamde HRH-sandwich (Holistisch - Reductionistisch - Holistisch; Bouma, 1997). Dit houdt in dat na een analyse op systeemniveau vragen worden geïdentificeerd die detailanalyse vragen op onderliggende procesniveaus (reductionisme): die kennis en dat inzicht wordt vervolgens weer gebruikt voor het ontwikkelen en ontwerpen van maatregelen en interventies op het systeemniveau. Deze combinatie van de specifieke inzichten en kennis van de reductionistisch georiënteerde specialist (planten-fysioloog, moleculair-bioloog, chemicus), en de op integratie gerichte generalist (productie-ecoloog, agronoom) blijkt het beste van twee werelden te bieden en diverse successen zijn daar inmiddels mee geboekt (Bouma, 1997).

# 5. Opties voor verbetering van de potentiële opbrengst, via plantenfysiologische inzichten

De potenties voor verbetering van de potentiële opbrengst van gewassen moeten vooral gezocht worden in de fenologische en morfologische processen. Vooruitgang van productiepotenties door beïnvloeding van de geometrische en fysiologische eigenschappen van plant en gewas is vrijwel volledig gerealiseerd. Zo is via beïnvloeding van de voedingstoestand van gewassen een situatie te creëren waarbij gedurende het groeiseizoen nooit een te veel of een te kort aan fosfaat, nitraat of micro-elementen bestaat. De infuusbenadering die de planten-fysioloog en productie-ecoloog al creëerden in de beschermde teelt, zal ook in de open teelten, maar dan via fijnregeling met verschillende agrotechnieken en fytotechnieken, kunnen worden toegepast.

Fertigatiesystemen in de fruitteelt, verfijnde irrigatietechniek vergen inzicht in de behoefte aan plantenvoeding gedurende het groeiseizoen. Die kennis komt steeds meer beschikbaar en voorkomt overdosering en ondervoeding in alle stadia van de gewasontwikkeling. De betreffende capaciteit van de plant is groot en gecombineerd met deze fijnregeling wordt een intrinsiek sterke plant gecreëerd, die beter bestand is tegen het grote leger van belagers; ziekten en plagen. Plotselinge explosies van ziekten en plagen worden als gevolg van brede resistentie eveneens voorkomen en de mogelijkheden van biologische bestrijdingstechnieken, zie verder, worden vergroot.

De verbeteringen in de groeidefiniërende factoren worden nu besproken: de fotochemische processen zijn dan vrijwel nooit limiterend voor de fotosynthese, het surplus aan aangeslagen fotonen wordt in de fluoriscentiemeting veelal als indicator van het suboptimaal functioneren aangemerkt. De biochemische processen tijdens de fotosynthese en de ademhaling, onderhouds- en groeiademhaling kunnen nauwelijks worden

beïnvloed. Zo uitgebreid de kennis van fotosynthese en groeiademhaling is, zo gering is die van onderhoudsademhaling en fotorespiratie. Door beter inzicht in de aard van deze processen is wellicht via transgene technieken de omvang van de fotorespiratie te verminderen. Daartoe is een introductie van C4-kenmerken in C3-planten een mogelijkheid.

Fenologische en morfologische processen hebben tot nu toe de grootste winst gebracht bij de productiviteitsverbetering. Via het verbeteren van de groeiomstandigheden, waardoor de fysiologische processen optimaal verlopen, is de productie van de totale biomassa in een groeiseizoen sterk vergroot, en via de beïnvloeding van de fenologie is dit groeiseizoen verlengd en daarenboven is door middel van een veranderde harvestindex het deel dat naar het nuttig product gaat sterk vergroot. Daar liggen nog meer mogelijkheden. Graan dat de harvest-index van aardappel (0.8) benaderd is waarschijnlijk onmogelijk vanwege de fysieke noodzaak een aar met een stengel die veel materiaal vergt, te ondersteunen. Een in de grond liggende aardappelknol heeft dat niet nodig. Verdere verbetering via fijnregeling van de verdeling gedurende het groeiseizoen kan nog wel vooruitgang opleveren. Met name de morfogenetische processen dienen dan te worden beïnvloed. Daar liggen legio mogelijkheden zoals de eerste resultaten van veredelingsprogramma's met QTL's aantonen (Stam, 1995). Door de toepassing van die technieken kunnen de gewenste morfogenetische eigenschappen worden ingebracht zoals voorbeelden bij rijst, tarwe, bonen en vele groentegewassen illustreren. De mogelijkheden om daarmee selectie en veredeling drastisch te versnellen en preciezer te maken, zullen de traditionele veredeling door trial-and-error volledig gaan vervangen.
Als gevolg van die inzichten en sterke verbetering van verschillende toe te passen technieken wordt de botte-bijl-benadering van de vroegere veredelingstechnieken aangevuld met het chirurgijnsmes van de nieuwe selectietechnieken en kan genetische variatie worden bevorderd en benut.

Daar liggen in feite grote kansen om moleculair-biologische technieken (Van Kammen, 1997) te benutten en in te zetten bij de verbetering van productiviteit en effectiviteit. Het doorbreken van soortsgrenzen, het

kunnen benutten van zeer specifieke eigenschappen en de genetische identificatie daarvan biedt nieuwe perspectieven.

# 6. Opties voor beheersing van de groeikortende factoren met behulp van productie-ecologische benaderingen

Productie-ecologie beperkt zich niet tot de groei en productie van gewassen, doch tracht ook de ecologische kennis en inzichten ontleend aan de evolutionaire en systeemecologie volledig te benutten en toe te passen bij het beheer van agro-ecosystemen en natuurlijke ecosystemen. Daartoe wordt gebruik gemaakt van populatiebiologische kennis en technieken. Zo blijkt in agro-ecosystemen de mogelijkheid om via antagonisten of andere biologische organismen de groeikortende factoren te beïnvloeden ongekend groot. De fijnregeling in de fyllosfeer en rhizosfeer met behulp van antagonisten van perthotrofe en biotrofe parasitaire schimmels staat nog maar in de kinderschoenen. Resultaten met gisten en antagonistische schimmels hebben al resultaat opgeleverd in proefsituaties en worden nu ook op kleine schaal toegepast in de beschermde teelt en bij de bollenteelt. Binnen één decennium zullen de mogelijkheden van dit type biologische gewasbescherming aanzienlijk toenemen, aangezien de mogelijkheden van antagonisten en de mogelijkheden van parasitaire en predatore organismen nog maar aan het begin van een agro-ecologische revolutie staan. Door die mogelijkheden te benutten zullen de groeikortende factoren primair via biologische methoden worden gecontroleerd. Dit geldt allereerst voor de insecten en mijten, waarbij de man-made secundaire plagen eerst worden aangepakt en daarna de primaire plagen. Fundamenteel ecologisch en entomologisch onderzoek heeft cruciale bijdragen geleverd aan de ontrafeling van interacties tussen planten, de herbivore belagers (insecten en mijten) en hun natuurlijke vijanden (de bestrijders). De afweerreactie van planten via vluchtige stoffen kunnen door bestrijders worden benut. Via veredeling kunnen die eigenschappen die biologische controle bevorderen worden benut (Vet, 1997). Het is ook zeker van toepassing voor de schimmels waarbij via gewasecologische benaderingen de uitgangsposities voor de competitie in de fyllosfeer en rhizosfeer in gunstige zin

*Grote mogelijkheden voor biologische bestrijding van ziekten, plagen en onkruiden.*

kunnen worden beïnvloed ten behoeve van die antagonisten, door fijnregeling van de exudatenhuishouding en beter inzicht in de mogelijkheden van de verschillende antagonisten op verschillende substraten (Fokkema, 1995). Ook de mechanismen die de moleculair-genetische basis van de resistentie tegen schimmelziekten in planten bepalen, worden steeds meer ontrafeld en kunnen worden gebruikt bij het ontwerpen en ontwikkelen van ziekteresistente planten. Voorbeelden daarvan zijn te vinden in tomaat, aardappel en tabak (De Wit, 1997).

In vele landbouwsystemen vormen onkruiden het hoofdprobleem. De introductie van herbiciden enige decennia geleden heeft de arbeids-behoefte zeer sterk teruggebracht, maar de veelvuldige bezwaren daar-tegen nemen toe. De onkruid-ecologie staat aan het begin van een biologische revolutie. De mogelijkheden van biologische agentia, het benutten van concurrentieverhoudingen in tijd en ruimte, de aanpassing van teeltsystemen, zijn nog maar net begonnen (Kropff, 1996; Mortimer, 1997).

Het standaardwerk op het gebied van concurrentie, On competition van De Wit, 1960 analyseert de wederzijdse beïnvloeding van individuele planten en toont aan hoe de concurrentieverhoudingen in mengsels kunnen worden gekarakteriseerd en begrepen op basis van gedetail-leerde analyses in monocultuur. Begrippen als relatieve opbrengst, concurrentie tegen de lege ruimte vonden ingang. Een verklaring voor verdringing tussen plantensoorten, en van de resultaten van meerjarige concurrentie experimenten konden worden gegeven. Aan die inzichten zijn de laatste jaren nieuwe begrippen en benaderingen toegevoegd. In concurrentiemodellen (Kropff, 1996) is nu de dynamiek van onkruid-gewasinteracties geïntroduceerd en daarmee is het inzicht en begrip veel verder ontwikkeld. Die modellen maken een ontwerp van gewassen mogelijk die qua fenologie en andere gewaseigenschappen voldoen aan de eisen die ze in staat stellen de strijd in de concurrentie met onkruiden te winnen. De fysiologische kennis van zaad, en groei en ontwikkeling van individuele plant en gewas leveren daartoe de basis.

# 7. Landgebruik en schaal-niveaus

Door de introductie van nieuwe technieken is plaatsbepaling op de vierkante meter mogelijk en de bovenomschreven fijnregeling van bemesting enz. kan daar worden toegepast. Op hogere schaalniveaus is eveneens gebruik van deze geografische informatiesystemen mogelijk. Het schaalniveau van de regio, van het stroomgebied, continent of de wereld kan worden bestudeerd. Verkenningen over de wereldvoedselproductie (Penning de Vries et al, 1995), die als onderdeel van een studie naar duurzame ontwikkeling werden uitgevoerd (WRR, 1994), konden nu vanuit de vaste voet van de kennis van de basisprocessen worden verricht en daarmee zichtbaar maken welke mogelijkheden er bestaan voor de regionale en lokale voedselvoorziening. Productie-ecologische verkenningen toonden ook aan dat landbouw waarbij het gebruik van pesticiden tot het uiterste minimum is beperkt binnen handbereik is. Deze analyses demonstreren dat productiviteitsverbetering heel goed gepaard kan gaan met verdere verbetering van de efficiëntie van het gebruik van hulpmiddelen en in het geval van de gewasbeschermingsmiddelen is zelfs voor de Europese Unie een reductie van 90 procent mogelijk, indien alle nu beschikbare methoden en technieken optimaal worden toegepast en het landgebruik wordt beperkt tot die gebieden waar de productieomstandigheden het best zijn (WRR, 1992; Rabbinge et al, 1994). Dan kan de voedselvoorziening worden veiliggesteld, kunnen milieutechnische verbeteringen worden toegepast en wordt het landgebruik minder schadelijk voor natuur en milieu.

Het werken op verschillende schaalniveaus is essentieel voor de productie-ecologie. Analyses op één aggregatieniveau, of op het niveau van één systeem zouden het zicht op aantrekkelijke perspectieven drastisch beperken. De voortdurende aggregatie en desaggregatie van spatio-temporele niveaus is essentieel voor een volledige benutting van de biologische mogelijkheden.

Het eco-regionale niveau wordt in de productie-ecologie uitgebreid bestudeerd. Daartoe zijn de mogelijkheden als gevolg van de integratie van de gewasecologische en bodemkundige kennis en inzichten sterk toegenomen. Het blijkt dat door het juiste landgebruik op de juiste plek te laten plaatsvinden, bijzonder veel vooruitgang in teelttechnische en milieutechnisch zin mogelijk is.

# 8. Landbouw als bron voor de fijnchemische industrie

De behoefte aan de productie van non-food producten door de landbouw stelt nieuwe eisen, maar de productie-ecologische uitdaging die daaruit voortvloeit is enorm. Door het betere inzicht in verschillende fysiologische processen kunnen planten als bioreactoren worden gebruikt. Als dit kleine hoeveelheden betreft, zoals bijvoorbeeld voor farmaceutische producten (zoals taxol); of voor geur (parfum) of smaakstoffen (yoghurt), is de productie-ecologische uitdaging beperkt tot het opschalen van subcellulair niveau naar gewassystemen. De waarde per eenheid product is zeer hoog en het areaalgebruik zeer gering. Voor gespecialiseerde, hoogtechnologische en kennisintensieve landbouw is daar een mogelijkheid weggelegd. Andere hoogwaardige producten, zoals specifiek zetmeel kunnen eveneens potentiële mogelijkheden bieden in zo'n kennis intensieve landbouw die zo kenmerkend is voor Nederland.
Opvallend veel van deze zeer specifieke producten betreffen secundaire plantenstoffen. Het gehalte van die producten in planten is groter naarmate de plant aan grotere druk wordt blootgesteld. De rol van groeibeperkende en groeikortende factoren moeten daartoe beter worden gekend. Dat vergt een totaal andere benadering van het primaire productieproces dan die welke nodig is voor productiviteits- en effectiviteitsverhoging. Productie van specifieke producten waarbij de plant als bioreactor wordt gebruikt kan via de moleculaire technieken in voorwaardelijke zin worden bevorderd. De feitelijke realisatie wordt vooral ook bepaald door de beheersing van de groei en productie van die gewassen.

*Planten als bioreactoren voor de fijnchemie.*

Indien plantaardig uitgangsmateriaal wordt gebruikt voor de productie van grondstoffen in de kunststofindustrie of voor brandstof is het areaalgebruik direct een veelvoud. Daarbij moet gedacht worden aan de vervanging van grondstoffen afkomstig uit de petrochemische industrie door grondstoffen afkomstig uit de primaire productie.

De zogenaamde 10 F-en spelen bij de afweging van kansen in landbouwkundige zin een belangrijke rol. Al naar gelang de volgorde in de reeks is de waarde per eenheid van product sterk toenemend: Flowers, Farmacy, Flavours, Fragrants, (F)egetables, Fruit, Food, Fodder, Fiber and Fuel.

Met 6000 ha Flowers wordt 60 procent van de wereldmarkt bediend en zo'n 10 miljard gulden gegenereerd. Met 120.000 ha snelgroeiend wilgehout kan een krachtcentrale ter grootte van 300 MW worden bediend, de waarde daarvan is zeer beperkt vanwege de nog zeer lage energieprijzen.

Het is om die reden dat een accent op de productie van non-foodgewassen vooral moet worden gericht op fijnchemische producten, dus pharmaceutische, specifieke uitgangsmaterialen voor de smaak en geurstoffenindustrie en wellicht ook op zeer hoogwaardige grondstoffen voor de kunststofindustrie. Het zal nog vele decennia duren voor de plant ook als producent voor de bulkindustrie kan worden benut. In principe is dat goed mogelijk, doch het vergt een zeer drastische verschuiving in de prijs van verschillende energiedragers.

# 9. Ecologische revoluties

In het voorgaande werd betoogd dat de productie-ecologie de weg naar duurzaamheid, hoe ook omschreven, goed kan begeleiden. Evolutionaire ontwikkeling en ook revoluties zullen zich de komende decennia kunnen voordoen. Hiervoor (hoofdstuk 6) is al op de belangrijkste ecologische revolutie op het terrein van de gewasbescherming ingegaan. Zo werden de toepassingen van antagonisten bij schimmels, fijnregeling in de rhizo- en fyllosfeer en het benutten van de mogelijkheden van parasieten en predatoren en benaderingen om onkruiden te onderdrukken genoemd.
In feite is pas vrij recent, mede als gevolg van een toenemende aversie tegen de blinde afhankelijkheid van pesticiden, volop gewerkt aan de verbetering en het benutten van de ecologische mogelijkheden van agro-ecosystemen. Dat betreft zowel de beïnvloeding van processen in fyllo- en rhizosfeer als het benutten van interdependenties van verschillende componenten van agro-ecosystemen op verschillende spatio-temporele niveaus. De mogelijkheden om via teelttechnieken, teeltsystemen en landgebruik de voorwaarden voor preventieve biologische zelfhulp te vergroten zijn blijkens analyses in rijstteeltsystemen (Bastiaans, 1994; Heong, 1996), aardappel (Schouten, Van der Werf, 1996), fruitteelt en granen zeer omvangrijk. Diverse malen werden vooroordelen ten aanzien van de mogelijkheden van biologische beschermings- en bestrijdings-technieken en de productiviteit van agro-ecosystemen weerlegd.
Veelal wordt naar voren gebracht dat de hoge productiviteit van agro-ecosystemen analoog is aan de topsporter die via dieten, trainingen, enz. in een labiele situatie wordt gebracht. Die analogie blijkt niet op te gaan. Integendeel, reeds in de zeventiger jaren werd door verschillende onder-zoekers bij voorbeeld Collyer, Van der Vrie, e.d. aangetoond dat de stabiliteit van biologische bestrijdingssystemen in acarinesystemen en bij secundaire plagen, zoals witte vlieg en bladluis bij hoge productie-niveaus, mits goed begeleid, toeneemt. Sedertdien is dat voor vele ande-re biologische bestrijdingssystemen in andere gewassen, zoals rijst met stengelboorders, bladvouwers en vuur, voor aardbeien met mijten, of voor mango met bladrollers aangetoond. Die stabiliteitsvergroting is het gevolg van de betere afstemming van groeidefiniërende en groei-

beperkende factoren waardoor noch een te veel, noch een tekort aan bijvoorbeeld assimilaten, aminozuren of andere stoffen die de populatie-ontwikkeling van potentiële schadeverwekkers kunnen stimuleren voorkomen. Dat vergt vanzelfsprekend wel de boven beschreven fijnregeling van nutriënten en waterbalansen.

# 10. Bedreigingen

Er bestaan ook bedreigingen voor de productie-ecologie. Vanuit veelvuldig geponeerde en beleden vooroordelen ten aanzien van de wijze waarop landbouw nu plaatsvindt, wordt een weg naar een landbouw zonder chemie gepropageerd. Daarmee wordt een taboe op kunstmest en chemische bestrijdingsmiddelen gelegd.
Zoals hiervoor is aangetoond is een landbouw met een zeer gering gebruik van chemische gewasbeschermingsmiddelen goed mogelijk. De biologische mogelijkheden zijn enorm. Het blinde vertrouwen in de chemische mogelijkheden is gelukkig verdwenen. Eenzelfde blind vertrouwen in de biologische mogelijkheden is onverstandig, daarom is volledige uitsluiting van de fytofarmacie een verkeerde weg. Via fijnregeling kan vooruitgang worden geboekt en kan in noodgevallen met een therapeutische dosis worden volstaan.

Anders ligt het met de groeibeperkende factoren. Daar zal uitsluiting van kunstmest niet alleen de wereldvoedselvoorziening in de waagschaal stellen, maar het zal ook de efficiëntie van de aanwending van hulpmiddelen in teelttechnische en milieutechnische zin sterk beperken. Bovendien zal een landbouw zonder kunstmest een veel omvangrijker landgebruik vergen, aangezien de verhouding akkerland en range-land in verschillende continenten ontoereikend is om de benodigde accumulatie van bodemvruchtbaarheid langs natuurlijke weg te garanderen (WRR, 1994). Daarbij moet zowel aan de benutting van dierlijke mest als de inzet van leguminosen worden gedacht. Daar kunnen goede resultaten mee worden geboekt (Lantinga, 1997), maar de N-cyclus vergt blijvend additionele input van langs industriële weg vastgelegde stikstof. Eliminatie van kunstmest zal de voedselzekerheid van zo'n 50 procent van de wereldbevolking onmiddellijk in gevaar brengen (Smil, 1997). Daarom zijn pleidooien in die richting, hoe begrijpelijk ook in een affluente samenleving, desastreus voor de wereldvoedselvoorziening. De aandacht voor de kwaliteit van product en productieproces die vanuit de samenleving wordt gevraagd, dwingt de productie-ecoloog tot steeds verdergaande benutting van de biologische zelfhulp en de ecotechnolo-

gie. Het gebruik van chemische middelen is voor wat betreft de plantenvoeding zowel teelttechnisch als milieutechnisch gewenst, doorgaans in combinatie met dierlijke mest. Doch voor de gewasbescherming is preventie, biologische zelfhulp en als laatste redmiddel, chemische gewasbescherming de aangewezen weg. Een taboe op bepaalde inputs kan de daartoe vereiste creativiteit ondermijnen. Dit taboe komt voort uit een onterechte chemofobie in een samenleving die steeds meer afhankelijk wordt van de vooruitgang in ons weten en begrijpen van ecosytemen op basis van de samenstellende chemische, fysische en fysiologische processen. Daarom is een anti-natuurwetenschappelijke houding ook zo funest. De bedreiging die daarmee uitgaat van met taboes belaste alternatieven, voor de ecologisering van de landbouw, voedselvoorziening en het landgebruik moet daarom niet worden gebagatelliseerd. De Verlichting heeft ons veel goeds gebracht en het valt niet te ontkennen, ook veel ongewenste ontwikkelingen, maar de oplossing van problemen wordt niet gevonden door het licht uit te doen!

# 11. Conclusies

In het voorgaande is betoogd dat de productie-ecologie een belangrijke bijdrage kan leveren aan de verdere ontwikkeling van een landbouw die teelttechnische en milieutechnisch optimaal is. Dat vergt veel kennis en inzicht van de basiswetenschappen. De mogelijkheden daartoe komen steeds meer voor handen en het is om die reden dat juist dit vakgebied een belangrijke bijdrage kan en zal leveren aan de ecologisering van de landbouw. Het beter benutten van gewasfysiologische, gewasecologische en agrotechnische inzichten zijn daarbij essentieel. Een systeem-benadering waarin breedte en diepte kan worden gecombineerd, is onontbeerlijk.

# Literatuurlijst


Bastiaans, L., 1993. Understanding yield reduction in rice due to leaf blast. PhD thesis, Wageningen Agricultural University, ISBN 90-5485-166-X.

Bindraban, P.S., 1997. Bridging the gap between plant physiology and breeding. PhD thesis, Wageningen Agricultural University.

Bouma, J., 1997. Soil Environmental Quality: A European perspective. Journal of Environmental Quality 26, pp. 26-31.

Duivenbooden, N. van, C.T. de Wit & H. van Keulen, 1996. Nitrogen, phosphorus and potassium relations in five major cereals reviewed in respect to fertilizer recommendations using simulation modelling Fertilizer Research 44, pp. 37-49.

Ittersum, M.K. van & R. Rabbinge, 1997. Concepts in production ecology for analysis and quantification of agricultural input-output combinations Field Crops Research 52(3), pp. 197-208.

Kammen, A. van, 1997. Moleculaire plantenbiologie. NRLO-rapport 97/36.

Kropff, M.J., 1996. Strategisch balanceren: onkruidkunde als toegepaste plantenoecologie; Inaugurale rede, Landbouwuniversiteit, Wageningen, 18 april 1996.

Penning de Vries, F.W.T., H. van Keulen & R. Rabbinge, 1995. Natural resources and limits of food production in 2040; In: Eco-regional approaches for sustainable land use and food production. Eds. J. Bouma, A. Kuyvenhoven, B.A.M. Bouman, J.C. Luyten & H.G. Zandstra, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, pp. 65-87.

Rabbinge, R., 1986. The bridge function of crop ecology. Netherlands Journal of Agricultural Science 34, pp. 239-251.

Rabbinge, R., 1993. The ecological background fo food production; In: Crop protection and sustainable agriculture. Ciba Foundation Symposium 177, John Wiley & Sons, Chicester, pp. 2-29.

Rabbinge, R., C.A. van Diepen, J. Dijsselbloem, G.J.H. de Koning, H.C. van Latesteijn, E. Woltjer & J. van Zijl, 1994. Ground for choices: A scenario study on perspectives for rural areas in the European Community; In: The future of the land: Mobilising and integrating knowledge for land use options. Eds. L.O. Fresco, L. Stroosnijder, J. Bouma & H. van Keulen, John Wiley & Sons, New York. pp. 95-121.

Smil Vaclar, 1997. Global Population and the Nitrogen Cycle. Scientific American, July 1997, pp. 58-63.

Stam, P., 1995. Weloverwogen keuzes; Inaugurale rede Landbouw-universiteit, 19 oktober 1995.

Vet, L.E.M., 1997. Biologische bestrijding heeft de toekomst. KNAW verkenning Biologie.

Werf, W. van der, 1988. Yellowing viruses in sugarbeet; epidemiology and damage. PhD thesis, Wageningen Agricultural University.

Wit, C.T. de, 1960. On Competition. Agricultural Research Reports 66.8, Pudoc, Wageningen.

Wit, C.T. de, 1992. Resource use efficiency in agriculture Agricultural Systems 40, pp. 125-151.

Wit, P.J.G.M. de, 1997. Plant tegen schimmel, gen tegen gen. KNAW verkenning Biologie.

WRR, 1992. Grond voor keuzen; Vier perspectieven voor de landelijke gebieden in de Europese Gemeenschap. Rapporten aan de regering nr. 42.

WRR, 1994. Duurzame risico's: een blijvend gegeven. Rapporten aan de regering nr. 44.

# Summary

R. Rabbinge, *Dynamics in science and technology: Crop production systems and production ecology*, The Hague (The Netherlands), National Council for Agricultural Research (NRLO), 1997. NRLO Report 97/37. [Original title: Ontwikkelingen in wetenschap en technologie - Plantaardige productiesystemen en productie-ecologie]

Production Ecology, the interdisciplinary field that bridges the gaps between the basic sciences, such as chemistry, physics and physiology which are explanation oriented, and the problem oriented agricultural sciences. The new possibilities in molecular ecology, whole plant physiology, crop and weed ecology, crop protection, plant breeding and geography all help to develop and design crop production systems and land use techniques that may combine high productivity with high efficiency. In that way various societal goals may be achieved and counter to general belief, high productive, environmental sound and biologically advanced agro-ecosystems may help to fulfil the so needed ecological revolution early in the next century. Crop defining factors may be further improved, crop growth limiting factors may be eliminated by fined tuning inputs, land use and water management, crop growth reducing factors may be manipulated by better use of preventive measures, resistance breeding using advanced technologies, biological control of pests and diseases and as a help of last resort therapeutic dosis of agrochemicals.