

# SIMULEREN VAN HET GROEIEN VAN LANDBOUWGEWASSEN\*

door dr. F. W. T. PENNING DE VRIES

*Het ontwikkelen van simulatiemodellen in biologie en landbouw maakte in de laatste decade een langzame maar zekere ontwikkeling door. Een stand van zaken wordt hier geschetst; en er wordt aangeduid waarom pas de laatste jaren modellen van landbouwgewassen ontstaan die van nut zijn voor de praktijk. Dit betreft dynamische en verklarende modellen om het groeien van gewassen te simuleren, alsmede het verloop van belangrijke omgevingsfactoren zoals bodemwater, nutriënten en ziekten en plagen. Met deze modellen wordt een basis verleend aan landbouwkundigen, plannenmakers en verwerkende industrieën om vroeg in het seizoen gewasooogsten te voorspellen, om landbouwkundige producties te berekenen van nieuwe gebieden en voor nieuwe omstandigheden, en om voorgestelde teelmaatregelen en verdelingsprogramma's vooraf te evalueren. Ook optimalisatie-beschouwingen liggen daarbij in het verschiet.*

## 1 INLEIDING

Al langer worden modellen gebruikt in het onderzoek. Met betrekking tot het fundamenteel onderzoek, dat de landbouw ondersteunt, helpen modellen deze studies beter te richten op vraagstukken, die dringend een oplossing vergen, dan wel goede perspectieven bieden voor verdere ontwikkeling.

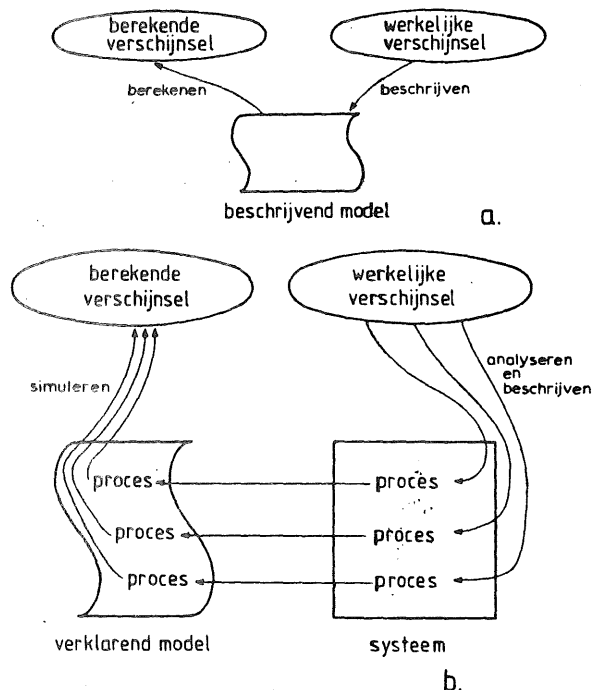
In dit artikel worden eerst enige achtergronden gepresenteerd over modellen ten behoeve van het simuleren van het groeien van landbouwgewassen. Vervolgens zal aangeduid worden voor welke situaties praktisch beschikbare modellen bestaan, en voor welke nog niet. Tenslotte wordt in het kort beschreven hoe dergelijke modellen in Wageningen ingeschakeld zijn bij onderzoek, en gebruikt worden voor de praktijk.

## 2 SYSTEEMANALYSE EN MODELLEN VAN GEWASGROEI

Simulatiemodellen zijn relatief eenvoudige voorstellingen van systemen in de wereld om ons heen. Dergelijke systemen kunnen worden gedefinieerd als betrekkelijk afgegrensde delen van de realiteit. Een systeem wordt door zijn gebruiker geïdentificeerd op basis van zijn eigen doeleinden en door de natuurlijke structuur van de werkelijkheid. Een veldgewas van tarwe, suikerbieten of aardappelen is zo'n systeem voor de landbouwkundige. De verschillende elementen ervan, te weten planteorganen (zoals blad, stengel en wortel) en verschillende processen, zoals groei en verdamping, oefenen over en weer een sterke invloed op elkaar uit. Het weer is van groot belang voor het groeien van het gewas en bepaalt mede de verdamping. Maar het gewas oefent op het weer nauwelijks invloed uit. Algemeener gesteld: de omgeving beïnvloedt het gewas en zijn gedrag aanmerkelijk, maar het omgekeerde is niet waar: het systeem beïnvloedt zelf

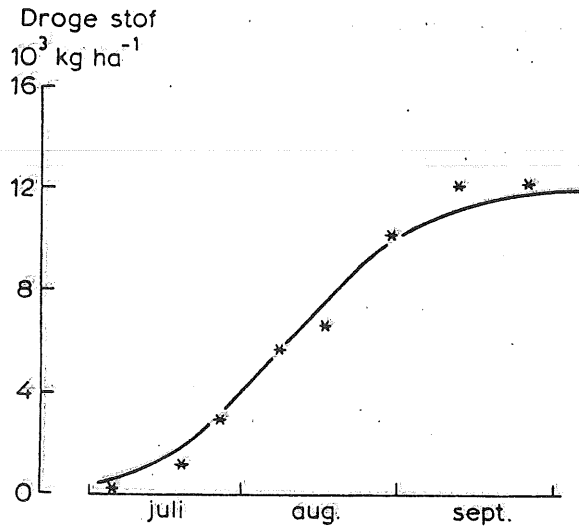
zijn omgeving niet of nauwelijks. Zo'n systeem is zeer geschikt om te simuleren. Onder 'gedrag' wordt daarbij verstaan het verloop van de snelheden van processen in het systeem, zoals het groeiverloop in de tijd. Een model is 'dynamisch' wanneer het dergelijke veranderingen simuleert. Simulatiemodellen zijn tegenwoordig bijna steeds als computerprogramma's uitgevoerd.

Om een simulatiemodel te ontwikkelen kunnen twee wegen gekozen worden: een beschrijvende en een verklarende. De eerste weg beschrijft het gedrag van een systeem op hetzelfde niveau als dat waarop de oorspronkelijke waarnemingen verricht zijn. In figuur 1a is dat sche-



*Figuur 1. Een schematische weergave van hoe verschijnselen uit de werkelijkheid geanalyseerd, beschreven en gesimuleerd worden met een beschrijvend model (1a) en met een verklarend model (1b).*

\* Dit artikel is gebaseerd op studies die over een aantal jaren door een aantal collega's werden gepubliceerd (Anonymus, 1984), met name van de Vakgroep Theoretische Teeltkunde van de Landbouwhogeschool en van het Centrum voor Agrobiologisch Onderzoek in Wageningen. Deze bijdrage aan 'Informatie', voorjaar 1984, is een bewerking van een Engelstalig artikel gepresenteerd op het symposium Biophysik Pflanzlicher Systeme, maart 1983 in Reinhardtsbrunn, Oost-Duitsland.



Figuur 2. Het verloop van het droge-stofgewicht van een maïsgewas tijdens het groeiseizoen van 1972. De punten geven meetwaarden aan, de lijn de waarden van de regressievergelijking

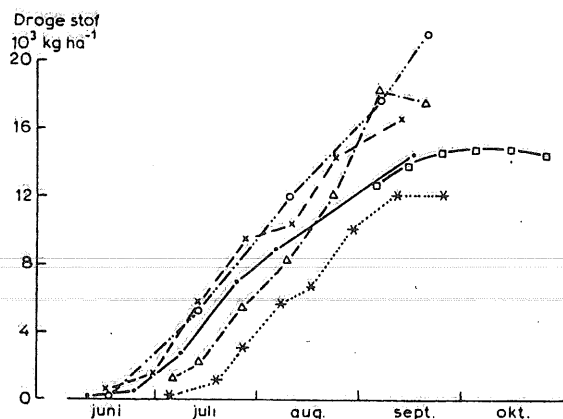
$$DS = \frac{12.0}{1.0 + 23.0 \times e^{-0.08 \times T}}$$

waarin DS het droge-stofgewicht is in ton per hectare, 12.0 geeft aan de maximale waarde die DS bereikt, T is de tijd in dagen na opkomst van het gewas, en 1.0, 23.0 en 0.08 zijn constanten.

matisch weergegeven. De wiskundige formule die een groeikromme weergeeft is zo'n beschrijvend model; figuur 2 geeft hiervan een voorbeeld. De formule is een regressielijn van bepaalde vorm, opgesteld aan de hand van een aantal waarnemingen die in dit voorbeeld het gewichtsverloop betreffen van een maïsgewas in Noord-Brabant in 1972.

De formule is zeer behulpzaam bij het vinden van waarden op tijdstippen waarop geen waarneming is verricht. Van jaar tot jaar verloopt echter de groei van een gewas iets anders, zoals figuur 3 duidelijk laat zien. Aanpassing van het startpunt voor het ene jaar en van het maximale

Figuur 3. Het verloop van het droge-stofgewicht van maïsgewassen in Nederland onder optimale omstandigheden in verschillende jaren: ● 1969, × 1971, \*1972, △ 1973, o 1976, □ 1976-1982 gemiddeld. (uit: Sibma, 1984)



gewicht in het andere is achteraf weliswaar mogelijk, maar bij toekomstvoorspellingen vervalt men onmiddellijk in speculaties. Het beschrijvende model heeft dus slechts een beperkte generaliserende waarde. Via het doen van vele proeven en het afleiden van vele formules en constanten zou dit probleem in theorie opgelost kunnen worden. In de praktijk blijken een groot aantal variabelen een rol te spelen in het groeiverloop, terwijl ook het arsenaal maïsrassen en teelttechnieken zich voortdurend iets wijzigen en het groeiverloop beïnvloeden. Te pogen die variabelen nauwkeurig te kwantificeren via omvangrijke veldexperimenten is een uitzichtloze weg. Beschrijvende modellen blijven dan ook van zeer beperkte waarde.

Het tweede type van modellen betreft de verklarende modellen, waarbij de processen die zich in het systeem afspelen de basis vormen van het model. Bijvoorbeeld, de snelheden van fotosynthese, van ademhaling en van bladvorming ten behoeve van groeisimulatie. Van deze processen wordt afzonderlijk en kwantitatief aangegeven hoe ze samenhangen met omgevingsfactoren, zoals licht en temperatuur, en met de status van het gewas, waaronder het watergehalte en het stikstofgehalte. Met het model worden de betreffende snelheden berekend voor elk moment van het groeiseizoen in afhankelijkheid van de actuele interne status, van het gewas en van het weer, en van de toestand van de bodem op dat moment. Deze relaties zijn schematisch weergegeven in figuur 1b. De groeisnelheid van het gewas is de resultante van deze individuele processen. Gedurende een korte tijdsspanne mag deze snelheid constant verondersteld worden. De biomassa in zo'n tijdstip gevormd is gelijk aan het product van snelheid en tijd, en wordt bijgeteld bij de reeds aanwezige massa. De berekening van de snelheden van alle processen wordt dan herhaald, waarbij de omgevingsfactoren of de interne status van het gewas iets veranderd zullen zijn. De berekeningen worden herhaald tot het gehele groeiseizoen met kleine stapjes doorlopen is.

Het gedrag van het model in een bepaalde situatie, de gewasgroei, kan zo verklaard worden uit de brede kennis van de fysiologische processen die eraan ten grondslag liggen, en uit de effecten van omgevingsfactoren daarop. De verklarende benadering gaat tenminste een stap verder dan de beschrijvende benadering, en soms wel twee of meer. De Wit (1968) wees erop dat de niveaus van verklarende processen en verklaard gedrag gekenmerkt worden door relaxatietijden van verschillende grootte, en ook dat ze als regel onderwerp van studie zijn in verschillende vakgebieden. Twee voordelen van verklarende modellen komen aldus tevoorschijn: hun gebruik bewerkstelligt een integratie van kennis van verschillende vakgebieden, waardoor de onderwerpen die bestudeerd kunnen worden vaker reële praktijksituaties betreffen, en de geldigheid van deze modellen betreft een veel breder gebied van omgevingsomstandigheden dan de beschrijvende modellen.

Het aantal processen dat van primair belang is om de groei van een veldgewas te simuleren is gelukkig beperkt, evenals de hoeveelheid details die nodig is om elk onderdeel ervan te kwantificeren. Zo is het vaak niet van belang de snelheid van fotosynthese van het gewas van uur tot uur en bladlaag tot bladlaag te berekenen, maar zijn dagtotalen voor het gewas als geheel voldoende.

Daarom is het niet nodig, en zelfs onzinnig, om bijvoorbeeld aspecten van membraanfysiologie als zodanig op te nemen in modellen van gewasgroei. Ondanks het feit dat onze kennis van de processen die van primair belang zijn nog verre van volledig is, kunnen daarom verklarende modellen toch bruikbaar zijn. Het is van weinig belang of de processen op het verklarende niveau op hun beurt beschrijvend dan wel verklarend benaderd zijn, zolang hun kwantificering maar geldig is binnen het traject van condities waarin het model gebruikt wordt. Hoe meer detail men wenst in de uitkomsten van een model, hoe meer detail het model zelf uiteraard bevatten moet, en hoe meer kennis van basisprocessen er dus ter beschikking moet staan.

Grote en ingewikkelde verklarende modellen zijn in de afgelopen jaren ontwikkeld op een tiental plaatsen in de wereld, waaronder Wageningen. Deze ontwikkeling verliep relatief langzaam, omdat sommige kennisvelden weliswaar goed ontwikkeld waren, maar deze sloten toch lang niet altijd aan. Integendeel, de biologie en landbouwwetenschappen hebben hun complexe onderwerpen aanvankelijk hoofdzakelijk beschrijvend en later met experimentele technieken analyserend bestudeerd. En hoewel het biologisch kennisveld steeds verder gevuld wordt, zijn er onmiskenbaar nog grote witte plekken. Die onderwerpen zijn gewoonweg moeilijk, en onze onderzoekstechnieken zijn nog ontoereikend.

Zulke grote en ingewikkelde modellen bevatten een rijkdom aan informatie, maar ze zijn tevens betrekkelijk onhandelbaar. Gebruik ervan is feitelijk beperkt tot hulp bij het afwegen van hypothesen en voor gevoeligheidsanalyses. Ook moet gesignaleerd worden dat de uitgebreide modellen feitelijk uitsluitend door diegenen gehanteerd kunnen worden die het model zelf opstelden. Dit beperkt niet alleen hun toepassing, het ondermijnt ook de geloofwaardigheid van modellen en modelbouwers. Het is een juiste ontwikkeling van de laatste jaren dat een aantal van deze grote modellen tot samenvattende modellen gereduceerd zijn. Deze samenvattende modellen behouden veel van de wetenschappelijke basis en kwaliteit van uitgebreide modellen, maar zijn veel eenvoudiger te benutten en toe te passen door anderen. In verschillende Post Academisch Onderwijs cursussen in Wageningen en onlangs in een cursus in Venezuela (Cordova e.a., 1983) is dat duidelijk gebleken.

### 3 MODELLEN OP VERSCHILLENDE NIVEAUS VAN GEWASPRODUKTIE

Om het voordeel te kunnen appreciëren dat men kan hebben van het gebruik van allerhande gewasgroeimodellen is het nodig zich te realiseren dat dit nut sterk met het onderwerp en doel samenhangt. De Wit (in: Penning de Vries en Van Laar, 1982) stelde een elegante en praktische wijze van indeling van systemen van gewasproductie voor, die ook bruikbaar is om te zien waar nu relatief sterke en betrekkelijk zwakke punten van modellen liggen. De nadruk bij deze indeling ligt op droge-stofproductie en groei, en weinig op de morfologische ontwikkeling van de planten. Vier niveaus van gewasproductie worden onderscheiden; de systemen van gewasproductie op elk van deze niveaus kunnen gezien worden als leden van een brede klasse van systemen. In volgorde van afnemende productie zijn deze vier produktieniveaus:

*Produktieniveau 1:* het gewas heeft voldoende water en nutriënten ter beschikking, zodat de groeisnelheid alleen van de gewastoestand en van het weer afhangt. Bij een volledige bedekking van de grond kan de groeisnelheid wel 200 tot 350 kg droge stof per hectare en per dag bedragen. Op onze meest intensieve akkerbouw- en graslandbedrijven treft men deze situatie aan, alsmede in de kasteelt waar overigens door lage lichtintensiteiten de groei vaak aanmerkelijk minder is.

*Produktieniveau 2:* de groei wordt beperkt door de beschikbaarheid van water, althans tijdelijk. Deze situatie doet zich van nature weinig spontaan voor, maar wordt bij enige bemesting vooral in semi-aride gebieden gecreëerd, en doet zich dan ook wel voor op onze hoge zandgronden.

*Produktieniveau 3:* de groei van het gewas wordt geremd door stikstoftekort voor tenminste een deel van het groeiseizoen, en door watertekort of door het weer voor de rest van de tijd. Deze situatie komt veel voor in landbouwsystemen over de gehele wereld, vooral waar weinig kunstmest gebruikt wordt. Ook in de vrije natuur is dit een veel voorkomende situatie.

*Produktieniveau 4:* groei van het gewas wordt beperkt door de lage beschikbaarheid van fosfor in de bodem of van andere mineralen voor tenminste een deel van de tijd. De groeisnelheden bedragen dan hoogstens 10 tot 50 kg droge stof per hectare en per dag gedurende een groeiseizoen van slechts een honderdtal dagen.

Ziekten, plagen en onkruiden kunnen op elk van de vier onderscheiden niveaus voorkomen. Ze geven als het ware aan de indeling in niveaus een tweede dimensie.

Het gebeurt maar zelden dat een concrete situatie precies past bij een van deze produktieniveaus, maar het is in groeistudies een praktische vereenvoudiging om specifieke situaties te herleiden tot een ervan. Dit richt de aandacht op de dynamica van de belangrijkste sturende factor uit de omgeving voor die situatie, en op de reacties van het gewas daarop. Andere omgevingsfactoren die dan geen regulerende invloed uitoefenen kunnen genegeerd worden; de groeisnelheid bepaalt dan de snelheid van absorptie of efficiëntie van gebruik van de niet beperkende factoren. Wanneer bijvoorbeeld de groei beperkt wordt door de beschikbaarheid van stikstof is het niet nuttig om op de eerste plaats de CO<sub>2</sub>-assimilatie en transpiratie en hun respons op veranderende omgevingsfactoren te bestuderen: daarvan gaat dan geen directe invloed op de groei uit. De nadruk behoort dan te liggen op de stikstofbalans, stikstofbeschikbaarheid, en op de reactie van het gewas op stikstof.

Uitgebreide en samenvattende modellen van gewasgroei zijn ontwikkeld voor de niveaus 1 en 2. Binnen zekere grenzen kunnen deze modellen een belangrijke rol vervullen bij onderwijs en kennisoverdracht, voor toepassing van kennis in de praktijk en om onderzoek te sturen. Enkele voorbeelden daarvan worden hieronder gepresenteerd. Voorlopige modellen en uitgebreide modellen bestaan op het niveau 3, maar samenvattende modellen nog nauwelijks. Dergelijke modellen zijn niet of weinig geschikt om voorspellingen mee te verrichten, maar kunnen onderzoek op die terreinen duidelijk meer doelgericht maken.

De 'state of the art' in het simuleren van gewasgroei is uitvoerig beschreven in enkele overzichtsartikelen en Simulation Monographs (De Wit e.a., 1978, Loomis e.a.

1979, Van Keulen en De Wit, 1981, Penning de Vries en Van Laar, 1982, Penning de Vries, 1983).

#### 4 STUREN VAN ONDERZOEK

Als illustratie van het richting geven aan onderzoek door gebruik van simulatiemodellen zal het werk van onze groep in Wageningen van de laatste 15 jaar geschetst worden, eerst in zeer grote lijnen en dan iets meer specifiek. Deze groep, waarvan ook de auteur deel uitmaakt, bestaat uit medewerkers van de vakgroep Theoretische Teeltkunde van de Landbouwhogeschool, het Centrum voor Agrobiologisch Onderzoek, de Stichting voor Onderzoek van Wereldvoedselvraagstukken, en van andere vakgroepen van de Landbouwhogeschool en instituten van landbouwkundig onderzoek. C. T. de Wit (zie elders in dit tijdschrift) was en is de belangrijkste initiator en stimulator ervan.

De groep die zich met modelbouw bezig houdt is vrij klein, en heeft veel interactie met experimenteel onderzoek. 'No simulation without experimentation' was daarbij De Wit's motto. Het simuleren van gewasgroei betrof aanvankelijk produktieniveau 1. Voortgang naar niveau 2 in het begin van de jaren zeventig vond plaats door assimilatie van modellen van de waterbalans van de bodem, en is vervolgens voortgeschreden tot niveau 3, waar we nog steeds zijn. De effecten van ziekten en plagen spelen op alle produktieniveaus, en zijn in de benadering geïncorporeerd door middel van studies van de populatiedynamica en gewas-pathogeen relaties, zoals door Rabbinge elders in deze aflevering is aangegeven. Simulatie van concurrentie tussen soorten, nodig bij het onderzoeken van schaderelaties van onkruiden, wordt eveneens uitgewerkt. Tenslotte verbreedt zich onze aandacht door modellen te benutten in verkenningen van mogelijkheden van produktie in ontwikkelingslanden, waarbij economische aspecten een belangrijke rol spelen.

##### 4.1 Koolstofbalans

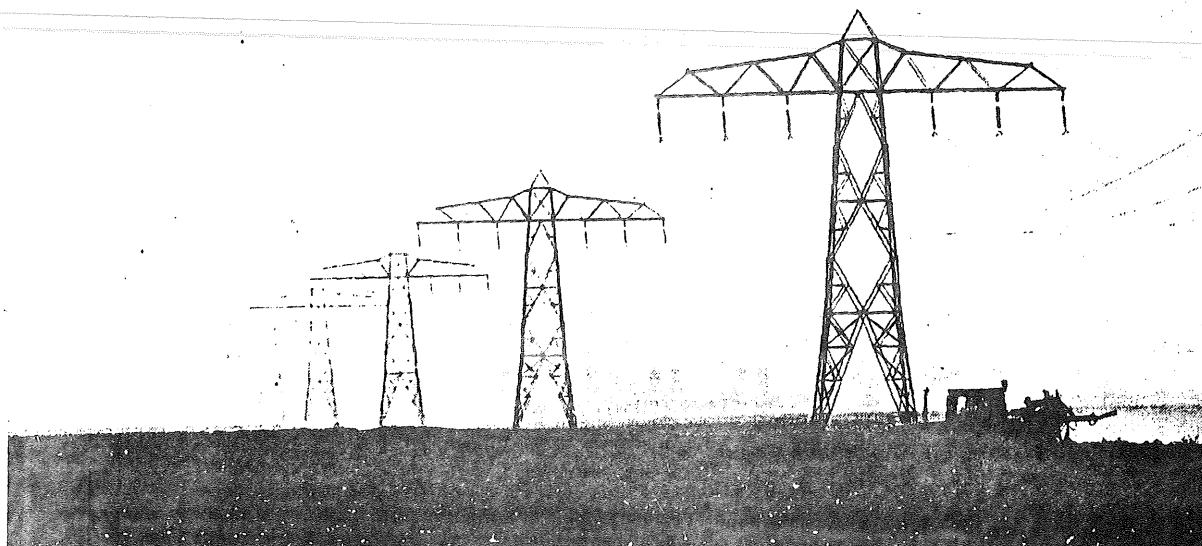
Ter illustratie van het sturen van onderzoek door gebruikmaking van simulatiemodellen zal ik hier wat explicieter ingaan op de ontwikkeling in het simuleren van de koolstofbalans van een gewas. De term 'koolstofbalans' verwijst naar de processen van aan- en afvoer van koolstof in het gewas; koolstof is het element dat ongeveer de helft van het totale gewicht van gedroogd plantmateriaal voor zijn rekening neemt, en omzettingen van koolstofhoudende verbindingen zijn bepalend voor de groei van de plant. De belangrijkste processen van de koolstofbalans zijn fotosynthese (het vastleggen van CO<sub>2</sub> uit de lucht als suiker), ademhaling (het verliezen van CO<sub>2</sub>), omzetting van suiker in plantmateriaal (groei in eigenlijke zin), en de verdeling van het nieuwe materiaal over de organen van het gewas.

Pogingen om de snelheid van fotosynthese van een gewas te berekenen met gegevens uit de plantefysiologie (zoals de samenhang van de fotosynthese van het blad met de lichtintensiteit) en van de structuur van het gewas, en met natuurkundige wetmatigheden (reflectie, transmissie en absorptie van diffuus en direct licht binnen het gewas) leverde een verklarend model (onder andere door De Wit, 1965). Dit was een statisch model: tijd was geen variabele erin. De resultaten ervan werden gebruikt, onder meer, om de potentiële voedselproduktie van de gebieden te schatten en daarmee perspectieven en doelein-

den te bieden voor teeltwijzen en veredeling. Een volgende stap werd gezet door het groeien van een gewas dynamisch te simuleren. Ademhaling werd daarbij eerst genomen als een vaste fractie van de fotosynthese, en later als een constante fractie van de aanwezige biomassa plus een hoeveelheid evenredig aan de groeisnelheid. Een functioneel evenwicht tussen wortel en spruit, waarbij de plant voortdurend een optimaal watergehalte nastreeft, maakte van het model een ELEMENTARY CROp growth Simulator (ELCROS, De Wit e.a., 1970). De kwantificering van ademhaling bleef echter onbevredigend omdat soortspecifieke eigenschappen en de invloed van omgevingsfactoren er niet in tot uiting kwamen. Daarom werd gepoogd ademhaling op verklarende wijze te benaderen, en wel op een biochemisch niveau. Groeiademhaling bleek daarbij op voorspelbare wijze samen te hangen met de biochemische samenstelling van de gevormde biomassa (Penning de Vries, 1974). Dezelfde benadering was echter slechts gedeeltelijk succesvol voor onderhoudsademhaling, omdat onvoldoende basisinformatie beschikbaar was. Micrometeorologie werd in het model geïntroduceerd (Goudriaan, 1977), onder meer om het effect van gewasweerstand op gas- en warmteuitwisseling te simuleren. Dit verfijnde en verbeterde het programma, met name ook ten behoeve van de berekening van de verdamping van het gewas. Tevens werd het model erdoor geschikt voor nauwkeurige simulaties van omstandigheden die ontwikkeling van bladziekten stimuleren. De BASIC CROp growth Simulator (BACROS) die hieruit groeide werd beschreven door De Wit e.a. (1978).

BACROS werd regelmatig geëvalueerd aan de hand van veldgegevens die door periodieke oogsten tijdens het groeiseizoen bepaald werden. Het langzamerhand zeer uitgebreide en gedetailleerde programma vergde echter evaluaties van gesimuleerd gedrag over perioden van uren, in plaats van 7 tot 14 dagen. Een veldlaboratorium werd daartoe ingericht om aan te velde staande gewassen fotosynthese, ademhaling en transpiratie vrijwel continu te kunnen meten (groei kan helaas nog niet direct en non-destructief gemeten worden). Dit leidde tot een volgende ronde van controleren, verbeteren en verbreden van de basis van het model. De belangrijkste conclusies:

1. De vaststelling dat huidmondjes in veldgewassen zonder watergebrek zich op twee wijzen gedragen kunnen: voortdurend open, of niet verder open dan in verband met fotosynthese nodig is (Louwerse, 1980). Dit verschijnsel heeft belangrijke implicaties voor het waterverbruik van gewassen.
2. Veldgewassen in goede omstandigheden fotosynthetiseren 10 tot 30% sneller dan onze modellen aangaven voor gelijke omstandigheden. De veronderstelde maximum fotosynthesesnelheden van individuele bladeren, een mogelijke onderschatting van de fractie diffuus licht van de totale straling, het effect van in de wind bewegende bladeren, de efficiëntie van ademhaling in sterk licht en de intensiteit van de onderhoudsrespiratie worden daarom alle nog eens goed onderzocht.
3. Met name aan het einde van de groeiperiode zijn er dikwijls verschillen tussen gesimuleerd en gemeten gewicht. Dit wijst er onder meer op dat de herverdeling van droge stof binnen het gewas van blad en stengel naar opslagorgaan nog te primitief gesimuleerd wordt.



Verder zijn samenvattende modellen ontwikkeld die veel toegankelijker zijn dan BACROS. Een voorbeeld daarvan is SUCROS, een Simple en Universal CROp growth Simulator (Van Keulen et al, 1982). Dergelijke modellen zijn vaak 10 tot 20 maal kleiner, en opereren intern weer met tijdstappen van 1 dag. Modellen van deze categorie zullen in de komende decade meer ontwikkeld worden.

Betrekkelijk weinig vooruitgang is nog geboekt bij het op verklarende wijze simuleren van de verdeling van nieuw gevormd materiaal over de verschillende organen van de plant. De voornoemde functionele balans tussen wortel en spruit is hierop een uitzondering, en een duidelijk perspectief is er ten aanzien van de simulatie van het korrelaantal en de korrelgrootte bij granen, waardoor de berekening van de graanoogst meer verfijnd kan worden. Verdeling van plantmateriaal over organen gebeurt verder nog hoofdzakelijk op beschrijvende wijze, te weten als het relatieve patroon van verdeling in relatie tot de fysiologische leeftijd van het gewas. Deze beschrijving is dus qua diepgang vergelijkbaar met die van de groeicurve van figuur 2. Deze beschrijving voldoet redelijk goed in modellen met tijdstappen van 1 dag en bij simulatie onder betrekkelijk normale omstandigheden. Maar wanneer afwijkingen van het normale patroon optreden ten gevolge van abnormaal weer of ziekten voldoet de formulering niet. Een doorbraak op dit punt is dringend gewenst (vgl Loomis e.a., 1979).

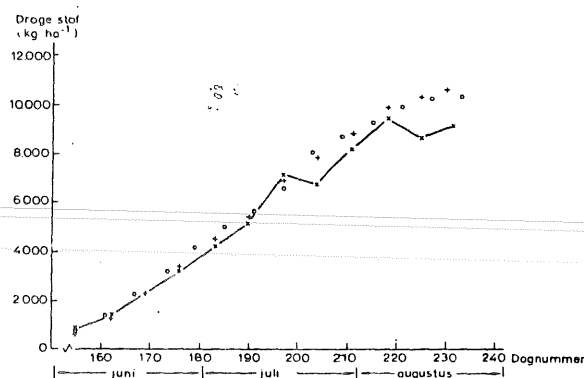
## 5 VOORSPELLEN VAN GROEI EN OPBRENGST

Op de produktieniveaus 1 en 2 zijn uitgebreide en samenvattende modellen opgesteld waarvan we claimen dat ze zover ontwikkeld zijn dat ze op beperkte schaal en voor wel omschreven doeleinden voorspellend te gebruiken zijn. 'Ontwikkeld' is vanzelfsprekend een relatief begrip en staat voor: redelijk compleet en getoetst. Het voorspellen van de potentiële opbrengst van een gewas en het daarbij behorende watergebruik ten behoeve van 'land use planning' is een geschikt onderwerp om model-

len bij in te schakelen. De potentiële oogsten van verschillende gewassen en hun waterbehoefte, alsmede het verloop daarvan in de tijd, in irrigeerbare gebieden kunnen bijvoorbeeld vooraf berekend worden. Daarmee kunnen gewichtige argumenten aangeleverd worden om te beslissen of een ontwikkelingsproject levensvatbaar lijkt of niet. Een voorbeeld van een dergelijke studie is de voorspelling van potentiële opbrengsten in de Sahel en in Peru. Later werd experimenteel aangetoond dat de berekende potentiële opbrengsten, welke nog nooit eerder in deze streken werden bereikt, realistisch waren (Versteeg e.a., 1982).

Met geëvalueerde uitgebreide of samenvattende modellen kan ook een gevoeligheidsanalyse worden uitgevoerd om af te tasten wat het effect is van een verandering in een gewaseigenschap of klimaatsfactor. Het eerste geval kan een toets betreffen om de mogelijke uitwerking op

*Figuur 4. De toename van het droge-stofgewicht van een veldbonegewas gedurende het groeiseizoen van 1979 in Wageningen bij optimale verzorging. De kruisjes geven de meetwaarden weer, de plusjes de waarden berekend met het samenvattende model en de cirkeltjes die met het uitgebreide model.*



opbrengst te kwantificeren van een veredelingsprogramma om bijvoorbeeld de onderhoudsademhaling in gewassen te halveren (vgl Wilson en Jones, 1982); het tweede geval de verkenning van het effect van de stijgende CO<sub>2</sub>-concentratie van de lucht op gewasproductie en watergebruik (Goudriaan, 1983). Veronderstellingen over het effect van luchtverontreiniging op fotosynthese of groei kunnen eveneens vrij eenvoudig worden toegevoegd aan deze modellen en de consequenties ervan worden berekend. (De feitelijke belemmering is natuurlijk het verkrijgen van feitelijke kennis over de wijze waarop verontreiniging op het functioneren van de planten in-grijpt.)

Een ander voorbeeld van praktische toepassing van simulatiemodellen is het programma EPIPRE, een berekensysteem in een computer om adviezen te geven aan boeren over frequentie van bespuitingen in tarwe (zie ook Rabbinge elders in dit nummer). Andere onderwerpen in deze sfeer worden door collega's uitgewerkt, onder meer ten behoeve van optimalisatie van kunstmest-toediening aan landbouwgewassen.

Om een indruk te geven van de kwaliteit van dergelijke uitgebreide en samenvattende modellen op produktieniveau 1 is een stel simulatieruns gemaakt voor een veldboongewas. BACROS (versie februari 1983) en SUCROS werden beide gebruikt voor deze situatie met dezelfde basisgegevens van planteigenschappen en met de feitelijke weersgegevens. De resultaten van veldproeven waren ook ter beschikking, en zijn met de simulatieresultaten in figuur 4 weergegeven. Ze tonen een goede overeenkomst tussen veldgewas en simulatieresultaat enerzijds, en tussen het uitgebreide model en het samenvattende anderzijds (dit werd verkregen zonder een van beide programma's opnieuw te draaien om betere uitkomsten te krijgen). De figuur vertoont enige afwijking aan het einde van het groeiseizoen tussen meting en simulatie. Gerichte verdere studies van mogelijke fysiologische oorzaken van dit verschil moeten nog tot verbeteringen op dit punt leiden.

#### LITERATUUR

- Anonymus. Lijsten van publikaties van de Vakgroep Theoretische Teeltkunde, Postbus 430, Wageningen, en van het Centrum voor Agrobiologisch Onderzoek, Postbus 14, Wageningen, 1984.
- Cordova, J, FWT Penning de Vries and HH van Laar, Modeling of crop production, evaluation of an international post graduate course held at IDEA, november, 1982. *Simulation Reports CABO-TT*, CABO, Postbus 14, Wageningen, 1983.
- De Wit CT, Photosynthesis of leaf canopies. *Agric. Res. Rep.*, 663, PUDOC, Wageningen, 1965.
- De Wit CT. *Theorie en model*. Inaugurele rede. Veenman en zonen, Wageningen, 1968.
- De Wit, CT, R Brouwer and FWT Penning de Vries. The simulation of photosynthetic systems. In: *Prediction and measurement of photosynthetic productivity, Proceedings IBP/PP Technical Meeting Trebon*, PUDOC, Wageningen, 1970.
- De Wit, CT e.a., *Simulation of assimilation, respiration and transpiration of crops*. Simulation Monographs, PUDOC, Wageningen, 1978.
- Goudriaan, J, *Crop micrometeorology, a simulation study*. Simulation Monographs, PUDOC, Wageningen, 1977.
- Goudriaan, J., HH van Laar, H van Keulen and W Louwarse. Simulation of the effect of increased atmospheric CO<sub>2</sub> on assimilation and transpiration of a closed crop canopy. In: *Biophysik pflanzlicher Systeme III*, K Unger ed. 1983.
- Loomis, RS, R Rabbinge and E Ng, Explanatory models in crop physiology. *Ann. Rev. plant Physiol.*, 30, 339-367, 1979.
- Louwarse, W. Effects of CO<sub>2</sub> concentration and irradiance on stomatal behaviour of maize, barley and sunflower plants in the field. *Plant, cell and environment*, 3, 391-398, 1980.
- Penning de Vries FWT, Substrate utilization and respiration in relation to growth and maintenance in higher plants. *Neth. J. agric. Sci.*, 22, 40-44, 1974.
- Penning de Vries FWT, Modelling of growth and production. *Encyclopedia of plant Physiology*, New Series, Vol 12D. Lange, Nobel Osmond and Ziegler, eds. Springer Verlag, Heidelberg, 1983.
- Penning de Vries FWT and HH van Laar, *Simulation of plant growth and crop production*. Simulation Monographs, PUDOC, Wageningen, 1982.
- Sibma, L. *De groei van mais onder Nederlandse omstandigheden*. PUDOC, 1984, in prep.
- Van Keulen, H and CT de Wit, A hierarchical approach to agricultural production modeling. *Modeling agricultural-environmental processes in crop production*, G. Gobulev and I. Shvytov eds., 1981
- Van Keulen, H, FWT Penning de Vries and EM Drees, 1982. A summary model of crop growth. In: Penning de Vries and Van Laar, 1982.
- Versteeg MN, I Zipori, J Medina and H Valdiva. Potential growth of alfalfa (*Medicago sativa* L) in the desert of Southern Peru and its response to high NPK fertilization. *Plant and Soil*, 67, 157-165, 1982
- Wilson D. and JG Jones, Effect of selection for dark respiration rate of mature leaves on crop yield of *Lolium perenne* cv S23. *Ann. bot.*, 49, 313-320, 1982.