

NOTA 1118

april 1979

Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding  
Wageningen

**ALTERRA**

Wageningen Universiteit & Research centre  
Omgevingswetenschappen  
Centrum Water & Klimaat  
*Team Integraal Waterbeheer*

GEWASPRODUKTIE EN WATERGEBRUIK

dr, R.A. Feddes

Nota's van het Instituut zijn in principe interne communicatiemiddelen, dus geen officiële publikaties. Hun inhoud varieert sterk en kan zowel betrekking hebben op een eenvoudige weergave van cijferreeksen, als op een concluderende discussie van onderzoeksresultaten. In de meeste gevallen zullen de conclusies echter van voorlopige aard zijn omdat het onderzoek nog niet is afgesloten. Bepaalde nota's komen niet voor verspreiding buiten het Instituut in aanmerking

## I N H O U D

	Blz.
I. INLEIDING	1
II. POTENTIËLE PRODUKTIE	2
a. Algemeen	2
b. Theoretische potentiële produktie van een standaardgewas	4
c. Potentiële produktie van een werkelijk gewas	5
III. WERKELIJKE PRODUKTIE	10
IV. PRODUKTIE EN WATERGEBRUIK	14
a. Resultaten van veldproeven	14
b. Fysisch georiënteerde modellen	23
V. SAMENVATTING EN AANBEVELINGEN	33
LITERATUUR	36
LIJST VAN GEBRUIKTE SYMBOLEN	38

## I. INLEIDING

Het is algemeen bekend dat wanneer een gewas als gevolg van water-tekorten niet potentiëel kan verdampen er een reductie in de opbrengst optreedt. Er moet dus een verband bestaan tussen de produktie van een gewas en de verdamping. Gesteld dat we dit verband kennen, dan moet het mogelijk zijn om bij een bekend verloop van de verdamping in de tijd het verloop van de produktie met de tijd te berekenen. Effekten van waterbeheersmaatregelen op de produktie zouden dan kunnen worden vastgesteld via de invloed die ze hebben op de verdamping.

Vroeger werden deze effekten vaak gemeten aan de hand van kostbare en veel tijd vergende proefvelden, zoals de grondwaterstands- en grondverbeteringsproefvelden. Met de komst van de computer is het echter mogelijk geworden om genoemde effekten te simuleren met behulp van numerieke modellen.

Een 'model' is een andere term voor een set van vergelijkingen die het fysische systeem beschrijven. Produktiemodellen kunnen erg eenvoudig of erg gecompliceerd zijn. Ze zijn een weergave van de huidige stand van kennis over het plant-produktie systeem. Aangezien hierbij vele aspecten een rol spelen, worden om tot een praktisch werkbaar model te komen dikwijls vereenvoudigde aannamen gedaan. Omdat voor bepaalde aspecten de kennis gering is wordt veel gebruik gemaakt van empirische relaties die ontleend zijn aan veldproeven.

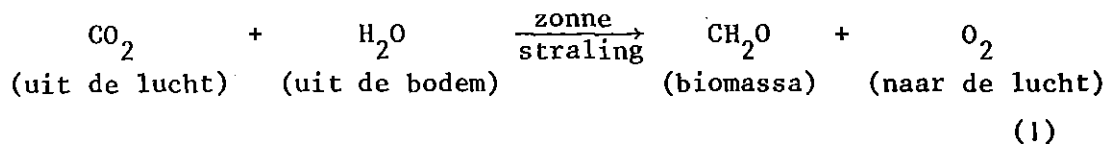
Het onderstaande beoogt een overzicht te geven van een aantal relatief eenvoudige modellen die de invloed van de waterhuishouding op de produktie kunnen voorspellen. Daarbij is de interesse voornamelijk gericht op de totale droge stofproduktie van een gewas.

## II. POTENTIELE PRODUCTIE

Voor het optimaliseren van de waterhuishouding in een gebied is het in het algemeen van belang om de maximale produktie te kennen die onder de heersende weersomstandigheden met een optimale water- en voedingsstoffenvoorziening kan worden gehaald. In dit hoofdstuk wordt een methode aangegeven om deze maximale, ook wel potentiële produktie genoemd, te berekenen.

### a. A l g e m e e n

Fotosynthese is het proces waarbij stralingsenergie wordt omgezet in chemische energie door de reductie van  $\text{CO}_2$  in de aanwezigheid van  $\text{H}_2\text{O}$  tot carbohydraten,  $\text{CH}_2\text{O}$



Dit proces heeft plaats in de chloroplasten van groene planten. Omdat energie nodig is voor het onderhoud en de groei van de plant wordt een deel van de opgeslagen carbohydraten geoxydeerd om de vereiste energie voor het respiratieproces (omgekeerde proces van verg. 1) te krijgen. Het verschil tussen bruto fotosynthese en ademhaling wordt de netto fotosynthese genoemd.

In het algemeen kunnen drie processen worden aangemerkt die van belang zijn voor de netto fotosynthese, namelijk diffusie, fotochemische en biochemische processen.

Door d i f f u s i e wordt het  $\text{CO}_2$ -transport van de buitenlucht door de huidmondjes en vervolgens naar de chloroplasten in het bladmesofyl geregeld. Bij normale temperaturen hangt dit diffusieproces af van het verschil in  $\text{CO}_2$ -concentratie buiten, ( $C_z$ ), en binnen, ( $C_0$ ) het blad. Bij het  $\text{CO}_2$ -transport moeten dezelfde weerstanden worden overwonnen als bij de diffusie van waterdamp, die plaats vindt in omgekeerde richting. Dit zijn de aerodynamische weerstand tussen de lucht en het effectieve bladoppervlak,  $r_a$ , en de weerstand voor moleculaire diffusie door de huidmondjes,  $r'_s$ . Bij het  $\text{CO}_2$ -transport moet

nog de extra weerstand tengevolge van de diffusie door de mesofylcellen,  $r'_m$ , worden overwonnen. Van dit laatste transport wordt aangenomen dat ze in de vloeibare fase plaats vindt. De diffusieweerstanden voor het gasvormig  $\text{CO}_2$ -transport,  $r'_s$ , zijn te relateren aan de diffusie voor  $\text{H}_2\text{O}$ -transport,  $r_s$ , door middel van de verhouding van hun diffusiecoëfficiënten:  $r'_s/r_s \approx D_{\text{CO}_2}/D_{\text{H}_2\text{O}} = 1,8$ . Onder stationaire omstandigheden kan het diffusieproces van  $\text{CO}_2$ , dus analoog aan de diffusie van  $\text{H}_2\text{O}$  worden beschreven als

$$P = \frac{C_z - C_0}{r_a + 1,8r_s + r'_m} \quad (\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}) \quad (2)$$

waarin P de fotosynthese snelheid,  $C_z$  en  $C_0$  respectievelijk de  $\text{CO}_2$  concentraties ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ) buiten en binnen het blad,  $r_a$  is aerodynamische weerstand ( $\text{s} \cdot \text{m}^{-1}$ ) voor waterdamptransport tussen lucht en blad,  $r_s$  is diffusieweerstand ( $\text{s} \cdot \text{m}^{-1}$ ) voor waterdamptransport door huidmondjes en  $r'_m$  is diffusieweerstand ( $\text{s} \cdot \text{m}^{-1}$ ) voor  $\text{CO}_2$ -transport door het mesofylweefsel.

Lage lichtintensiteiten en  $\text{CO}_2$ -concentraties kunnen het diffusieproces indirect beïnvloeden door de sluiting van de huidmondjes, waarbij  $r_s$  (en  $r'_m$ ) toenemen.

De f o t o c h e m i s c h e processen zijn verantwoordelijk voor de reductie van  $\text{CO}_2$  tot  $\text{CH}_2\text{O}$  onder invloed van licht (0,4-0,7  $\mu\text{m}$ ).

De b i o c h e m i s c h e processen zorgen voor de chemische reductie van  $\text{CO}_2$  en zijn sterk temperatuurafhankelijk.

Daar de fotosynthese of groeisnelheid van een gewas wordt beïnvloed door factoren als zonnestraling, temperatuur, water, voedingsstoffen, zuurstof en koolzuur, kan potentiële groei alleen worden bereikt wanneer al deze factoren in voldoende mate beschikbaar zijn. Potentiële groei hangt dan alleen nog af van de groeicapaciteit van de plant. Wanneer één van genoemde groeifactoren in beperkte mate aanwezig is wordt de groeisnelheid en uiteindelijk de produktie gelimiteerd. Een en ander kan worden geïllustreerd aan de hand van fig. 1, waarin de gemeten groeisnelheid van een apart komkommerblad wordt gegeven in relatie tot de lichtintensiteit bij een limiterende

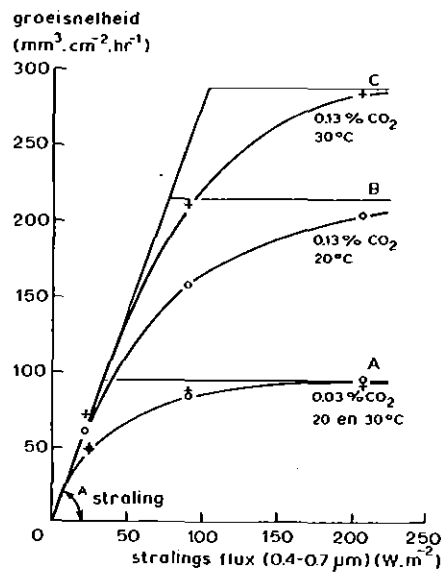


Fig. 1. Groeisnelheid van een komkommerblad in afhankelijkheid van de lichtintensiteit voor een limiterende (0,03%) en een verzadigings (0,13%) CO<sub>2</sub>-concentratie bij twee verschillende temperaturen. Voor curve A is de limiterende factor CO<sub>2</sub>, voor curve B de temperatuur en voor curve C de lichtintensiteit (naar Gaastra, 1963)

(0,03%) en een niet-limiterende verzadigde CO<sub>2</sub>-concentratie (0,13%). Onder de omstandigheden van curve A limiteert de CO<sub>2</sub>-diffusie de fotosynthese. Een toename van de CO<sub>2</sub>-concentratie tot verzadiging levert curve B. Hier is de temperatuur de limiterende factor, zodat een toename in de temperatuur van 10°C een sterke toename in de fotosynthese bewerkstelligt (curve C).

#### b. Theoretische potentiële produktie van een standaardgewas

De bruto fotosynthese van een gewas kan in theorie worden berekend met een model ontwikkeld door DE WIT (1965) waarin de stand van de zon, de bewolgingsgraad, de architectuur van het gewas en de fotosynthesefunctie van de afzonderlijke bladeren zijn verdisconteerd. Er van uitgaande dat het zichtbare licht (0,4-0,7 μm) de belangrijk-

ste produktiefactor is, berekent De Wit de produktie van een zogenaamd 'standaardgewas' op heldere en bewolkte dagen voor iedere afzonderlijke dag en plaats. Een standaardgewas wordt gedefinieerd als een gewas met een bladoppervlakte-index  $I = 5$  (5 ha bladeren op 1 ha grondoppervlak) dat volledig is voorzien van water, mineralen en stikstof met een aerodynamische weerstand  $r_a = 50 \text{ s.m}^{-1}$ . De resultaten van De Wit's berekeningen kunnen worden geïllustreerd aan de hand van fig. 2, die voor Nederland ( $52^\circ \text{N}$ ) de verdeling van de lichtenergie op heldere dagen ( $R_c$ ) over het jaar laat zien. De lichtenergie op bewolkte dagen wordt op  $0,2 R_c$  gesteld. Met behulp van deze aanname en bepaalde stralings- en bladfunctieverdelingen in het gewas, berekende De Wit (zie fig. 1 en tabel 1) produktiesnelheden voor heldere dagen,  $P_c$ , en bewolkte dagen,  $P_o$ . Uit fig. 1 blijkt dat  $P_o \approx 0,5 P_c$ . De bruto produktiesnelheid van een standaardgewas,  $P_{st}$ , op een willekeurige dag wordt gevonden als

$$P_{st} = \Lambda P_o + (1 - \Lambda) P_c \quad (\text{kg.ha}^{-1}.\text{dag}^{-1}) \quad (3)$$

waarin  $\Lambda$  de fraktie van de hemel is die op die dag door bewolking bedekt is. De waarde van  $\Lambda$  kan worden bepaald via schattingen van de bewolkingsgraad of via de uitdrukking

$$\Lambda = \frac{R_c - R}{0,8 R_c} \quad (-) \quad (4)$$

waarin  $R \text{ (W.m}^{-2}\text{)}$  de stralingsflux in het golflengtegebied van  $0,4\text{-}0,7 \mu\text{m}$  is. Bij goede benadering geldt dat  $R = 0,5 R_s$ , waarin  $R_s$  de kortgolvlige inkomende stralingsflux is.

#### c. P o t e n t i ë l e p r o d u k t i e v a n e e n w e r k e l i j k g e w a s

Onder werkelijke condities in het veld kunnen de produktiesnelheden van tabel 1 niet worden gehaald. Deze moeten worden gecorrigeerd vanwege de volgende oorzaken (RIJTEMA en ENDRÖDI, 1970; FEDDES, 1971; FEDDES e.a., 1978):

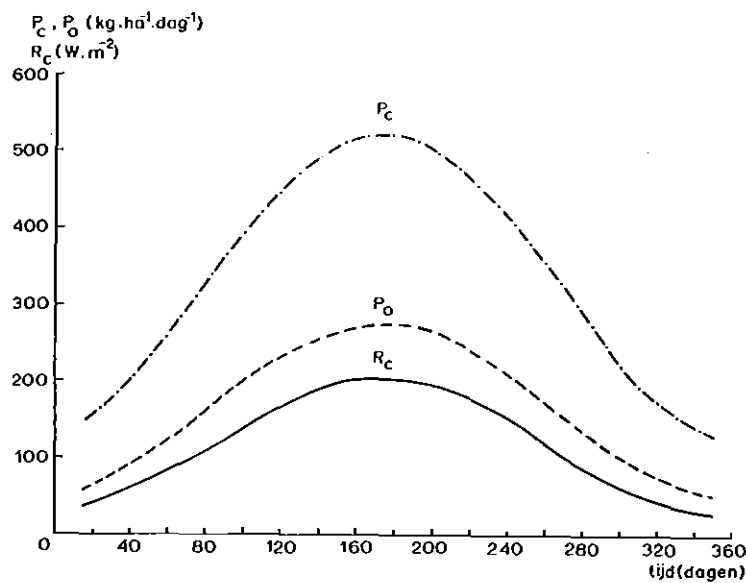


Fig. 2. Jaarlijkse variatie van de bruto fotosynthesesnelheid op 52°N breedte (Nederland) van een 'standaardgewas' op heldere dagen ( $P_c$ ) en op bewolkte dagen ( $P_o$ ), en van de lichtintensiteit op heldere dagen ( $R_c$ ) (afgeleid van De Wit, 1965)

Tabel 1. Dagelijkse totalen stralingsflux (0,4-0,7  $\mu\text{m}$ ) op heldere dagen  $R_c$  ( $\text{W.m}^{-2}$ ), produktiesnelheden op heldere dagen  $P_c$  en op onbewolkte dagen  $P_o$  ( $\text{kg.ha}^{-1}.\text{dag}^{-1}$ ) voor een standaardgewas in Nederland (52°N) bij  $r_a = 50 \text{ s.m}^{-1}$ , afgeleid van De Wit (1965)

Tijdstip dag	15/1 15	15/2 46	15/3 75	15/4 106	15/5 136	15/6 167	15/7 197	15/8 228	15/9 259	15/10 289	15/11 320	15/12 350
$R_c$	30,2	57,4	94,4	142,8	181,6	201,2	194,4	163,6	117,8	73,2	39,6	25,4
$P_c$	130,8	208,6	298,8	403,8	484,6	526,4	511,8	445,6	349,6	247,0	157,2	113,8
$P_o$	51,8	92,0	142,8	203,0	249,8	273,6	265,0	227,2	172,0	113,2	64,6	43,0

A d e m h a l i n g. De verliezen tengevolge van ademhaling bedragen tussen 20 en 50% van de bruto potentiële produktie. SIBMA (1968) vond uit veldproeven dat een gewas vanaf het tijdstip dat de grond volledig bedekt is tot het rijpingsstadium, gemiddeld 225 kg droge stof. $\text{ha}^{-1}.\text{dag}^{-1}$  produceert. Daar de bruto produktiesnelheid ongeveer



$320 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{dag}^{-1}$  is, bedraagt het ademhalingsverlies ongeveer 30%. De laagste ademhalingsverliezen die in de literatuur te vinden zijn bedragen ongeveer 20%. Dus om rekening te houden met ademhalingsverliezen moet de bruto potentiële produktiesnelheid,  $P_{st}$ , vermenigvuldigd worden met een respiratiefaktor  $\phi_r$ . Bedraagt het ademhalingsverlies bijvoorbeeld een faktor 0,3 dan is  $\phi_r = 1 - 0,3 = 0,7$ .

**T e m p e r a t u u r.** De fotosynthese hangt af van de temperatuur. Deze invloed kunnen we kwantificeren door de introductie van een faktor  $\alpha_T$  (fig. 3). Deze faktor geeft het limiterende effect van de temperatuur op de groei weer. Bij optimale graeitemperatuur is  $\alpha_T = 1$ . Dus vermenigvuldiging van  $P_{st}$  met  $\alpha_T$  geeft de correctie voor luchttemperaturen die afwijken van het optimum

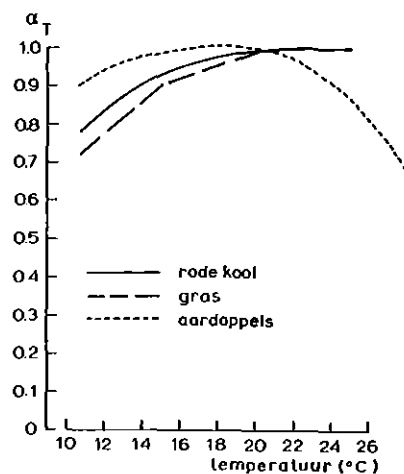


Fig. 3. Invloed van de temperatuur op de fotosynthese van rode kool, gras en aardappelen, gekarakteriseerd met de temperatuurfaktor  $\alpha_T$  (naar Feddes e.a., 1978)

**B o d e m b e d e k k i n g.** Gedurende het eerste gedeelte van het groeiseizoen vindt fotosynthese alleen plaats via het gedeelte van de bodem dat door het gewas bedekt is,  $S_c$ . Vermenigvuldiging van  $P_{st}$  met  $S_c$  geeft de correctie voor de bodembedekking (fig. 4).

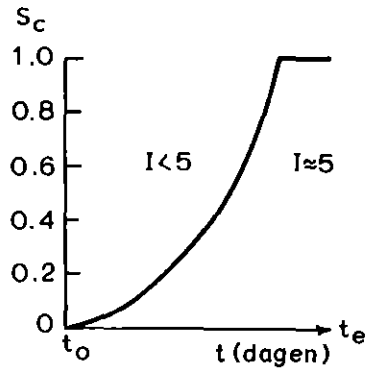


Fig. 4. Voorbeeld van de verandering in bodembedekking  $S_c$  van een gewas met de tijd  $t$ ;  $I$  = bladoppervlakte-index (naar Feddes e.a., 1978)

Ge oog s t e p r o d u k t. Bruto potentiële produktiesnelheden worden berekend voor de totale plant, dus voor spruit plus wortels. Wanneer men alleen geïnteresseerd is in de droge stofproduktie van bijvoorbeeld de bovengrondse delen moet men corrigeren voor de hoeveelheid wortels. Dit kan door een top/(top + wortel) verhoudingsparameter,  $\beta_h$ , in te voeren (fig. 5). Deze verhouding kan ook worden geïnterpreteerd als de fraktie geogst produkt/totaal gewas. De nadruk wordt er op gelegd dat  $\beta_h$  gedurende het groeiseizoen aanzienlijk kan variëren. In het voorjaar vormen de wortels het grootste gedeelte van de plant, terwijl dit zich later wijzigt ten gunste van de spruit.

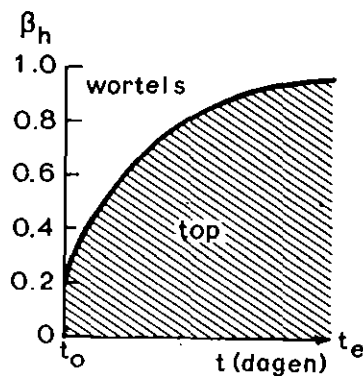


Fig. 5. Voorbeeld van de verandering in de scheut/(scheut + wortel) parameter  $\beta_h$  van een gewas met de tijd  $t$  (naar Feddes e.a., 1978)

Voor een uitvoerig kwantitatief overzicht van bovengenoemde factoren bij diverse gewassen wordt verwezen naar FEDDES e.a. (1978). Samenvattend kunnen we voor de potentiële produktiesnelheid van een werkelijk gewas  $\dot{q}_{pot}$  schrijven:

$$\dot{q}_{pot} = P_{st} \cdot \phi_r \cdot \alpha_T \cdot S_c \cdot \beta_h \quad (\text{kg.ha}^{-1}.\text{dag}^{-1}) \quad (5)$$

Substitutie van verg. (3) in verg. (5) levert:

$$\dot{q}_{pot} = \left[ \lambda P_o + (1 - \lambda) P_c \right] \cdot \phi_r \cdot \alpha_T \cdot S_c \cdot \beta_h \quad (\text{kg.ha}^{-1}.\text{dag}^{-1}) \quad (6)$$

Het is duidelijk dat verg. (6) een sterk vereenvoudigde schematisering van de werkelijkheid is. Onlangs is door DE WIT e.a. (1978) het model BACROS (basic crop simulator) ontwikkeld, dat de potentiële groeisnelheid van een gewas in detail simuleert. Voor een kwalitatieve beschrijving, zie DE WIT (1978). In dit model wordt de transpiratie en de fotosynthese van de afzonderlijke bladeren berekend over verschillende lagen binnen een gewas. De centrale toestandsvariabelen zijn de hoeveelheid reserves en het watergehalte van het gewas; de voornaamste sturende variabelen zijn de weersgegevens. In het programma worden als ijking onder andere gemeten waarden van het spruit- en het wortelgewicht gebruikt. De bodem wordt op veldcapaciteit gehouden. Transport van water in de grond wordt buiten beschouwing gelaten. De consequenties van het gebruik van een dergelijk relatief gedetailleerd model is dat nogal wat invoergegevens nodig zijn.

### III. WERKELIJKE PRODUKTIE

Voor de beschrijving van de werkelijke produktie van een gewas is een aantal modellen ontwikkeld. Het onderstaande geeft een kort overzicht van deze modellen.

W e e r s t a n d e n m o d e l. Door RIJTEMA en ENDRÖDI (1970) is met behulp van verg. (2) een formulering voor de produktiesnelheid van een gewas ontwikkeld voor omstandigheden afwijkend van  $r_a = 50 \text{ s.m}^{-1}$ . Indien voor het standaardgewas met  $r_a = 50 \text{ s.m}^{-1}$  en optimale aanvoer van water geldt dat  $r_s = 0$  en  $r' = 440$  dan is overeenkomstig verg. (2) de uitdrukking voor de produktiesnelheid van een standaard-gewas:

$$P_{st1} = \frac{\Delta_1 \text{ CO}_2}{50 + 0 + 440} \quad (\text{kg.ha}^{-1}.\text{dag}^{-1}) \quad (7)$$

waarin  $\Delta_1 \text{ CO}_2$  het concentratieverschil ( $\text{kg.m}^{-3}$ ) in  $\text{CO}_2$  binnen en buiten het gespecificeerde gewas is.

Voor het standaardgewas onder werkelijke condities (= afwijkende  $r_a$ ) geldt:

$$P_{st2} = \frac{\Delta_2 \text{ CO}_2}{r_a + 1,8 r_s + r'_m} \quad (\text{kg.ha}^{-1}.\text{dag}^{-1}) \quad (8)$$

Aannemende dat  $\Delta_1 \text{ CO}_2 = \Delta_2 \text{ CO}_2$ , geeft deling van verg. (8) door verg. (7) en herschrijven:

$$P_{st2} = \frac{490}{r_a + 1,8 r_s + r'_m} P_{st1} \quad (9)$$

Om nu tot de werkelijke groeisnelheid van een willekeurig gewas te komen voeren RIJTEMA en ENDRÖDI (1970) naast de werkelijke bodembedekking,  $S_c$ , een reductiefactor,  $\alpha_{ph}$ , in, waarin het totale effect van ademhalingsverliezen, temperatuurverandering van bladeren, etc. in verdisconteerd is. Dit leidt dan voor de snelheid van de totale droge stofproduktie tot:

$$\dot{P} = \frac{490}{r_a + 1,8 r_s + r'_m} \cdot P_{st} \cdot \alpha_{ph} \cdot S_c \quad (\text{kg.ha}^{-1}.\text{dag}^{-1}) \quad (10)$$

waarin  $\dot{P}$  de produktiesnelheid van het totale gewas (boven- en ondergrondse delen te samen) is.

**M o d e l C R O P R.** Dit model is ontwikkeld door FEDDES e.a. (1978) en beschrijft de groeisnelheid  $\dot{q}_{act}$  als een niet-rechthoekige hyperbolische funktie van de groeifactor water,  $w$ , volgens de vergelijking:

$$\left(1 - \frac{\dot{q}_{act}}{Aw}\right)\left(1 - \frac{\dot{q}_{act}}{\dot{q}_{pot}}\right) = \xi \quad (11)$$

waarin  $A$  de maximale efficiëntie van een plant voor water is en  $\xi$  een mathematische flexibiliteitsconstante, waarbij  $\xi \ll 0$  bijvoorbeeld  $\xi \rightarrow 0,01$ . Bij de parameter  $w$  moet gedacht worden aan het watergebruik door de plant, dus bijvoorbeeld de verdampingssnelheid. Hierop wordt later nader ingegaan. Een grafische afbeelding van verg. (11) is weergegeven in fig. 6 (vergelijk ook fig. 1). De groeicurve wordt hier begrensd door twee asymptoten  $l$  en  $p$ . De lijn  $l$  laat een recht-evenredige toename van de groeisnelheid zien met een toename van de groeifactor water en is dus een indicatie van de produktiviteit van het gewas voor water. Dus voor  $\xi \rightarrow 0$ ,  $\dot{q}_{act} \rightarrow A.w$ . Lijn  $p$  in fig. 3 vertegenwoordigt het produktieniveau bij een voldoende aanvoer van de groeifactor water, maar bij een maximaal produktieniveau dat wordt gelimiteerd door de andere groeifactoren te samen. Voor  $\xi \rightarrow 0$ ,  $\dot{q}_{act} \rightarrow \dot{q}_{pot}$ . Zoals we hebben gezien in (verg. 6) zijn in dit potentiële produktieniveau de effecten van werkelijke zonneshijn, luchttemperatuur, ademhalingsverliezen en bodembedekking verdisconteerd. Uit fig. 3 is ook te zien dat de minimale hoeveelheid water die nodig is om potentiële groei te verkrijgen wordt weergegeven door het snijpunt van de lijnen  $l$  en  $p$ .

Na vermenigvuldiging en herschrijven kan verg. (11) worden geschreven als:

$$\dot{q}_{act}^2 - \dot{q}_{act}(\dot{q}_{pot} + Aw) + Aw \dot{q}_{pot}(1 - \xi) = 0 \quad (12)$$

met voor de twee asymptoten de vergelijkingen

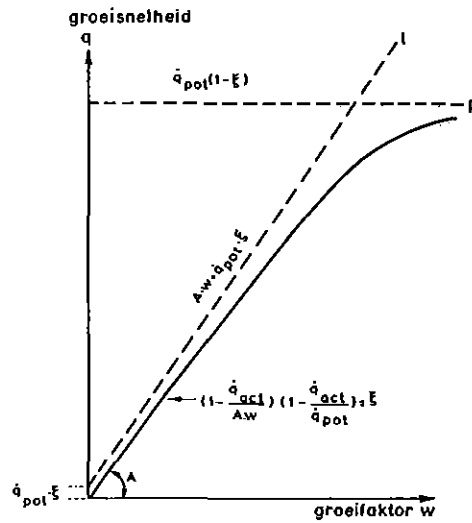


Fig. 6. Werkelijke groeisnelheid  $\dot{q}$  beschreven als een niet-rechthoekige hyperbolische functie van de groeifactor water  $w$ , welke begrensd wordt door de asymptoten  $l$  en  $p$  (naar Feddes e.a., 1978)

$$\dot{q}_{act} = \dot{q}_{pot} (1 - \xi) \quad (13)$$

$$\dot{q}_{act} = Aw + \dot{q}_{pot} \xi \quad (14)$$

Verg. (12) is van het type

$$ax^2 + bx + c = 0$$

Omdat de voorwaarde geldt dat  $0 < \dot{q}_{act} \leq \dot{q}_{pot}$ , is slechts één van de oplossingen geldig, namelijk

$$x_1 = \frac{-b - \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$$

De oplossing van verg. (12) wordt dan

$$\dot{q}_{act} = \frac{A}{2} w + \frac{\dot{q}_{pot}}{2} - \frac{1}{2} \left[ (\dot{q}_{pot} + Aw)^2 - 4 \dot{q}_{pot} Aw(1 - \xi) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (15)$$

In verg. (15) worden de grootheden A en  $\xi$  constant genomen gedurende het groeiseizoen. Volgens FEDDES e.a. (1978) is een redelijke waarde voor  $\xi \approx 0,01$ .

Wanneer we werken met opeenvolgende gescheiden intervallen van 1 dag moet verg. (15) geëvalueerd worden voor de dagen afzonderlijk. De uiteindelijke produktie  $Q_{act}$  kan dan worden berekend als de som van de dagelijkse groei over het groeiseizoen. Indien  $i$  een willekeurige dag van de groeiperiode is ( $i = 1, 2, 3, \dots, n$ ) dan geldt:

$$Q_{act} = \sum_{i=1}^n \dot{q}_{act}^i \cdot \Delta t \quad (16)$$

Op eenzelfde manier kan de potentiële produktie worden berekend als

$$Q_{pot} = \sum_{i=1}^n \dot{q}_{pot}^i \cdot \Delta t \quad (17)$$

waar in beide vergelijkingen  $\Delta t$  een periode van 1 dag voorstelt.

#### IV. PRODUCTIE EN WATERGEBRUIK

De relatie tussen produktie en watergebruik is de laatste jaren aan intensief onderzoek onderworpen geweest. Voor een recent overzicht van waterbehoefte van gewassen en hun toepassing in irrigatieschema's, zie DOORENBOS en PRUITT (1977).

In het onderstaande worden de volgende termen voor het watergebruik aangehouden. De term 'evapotranspiratie',  $ET$ , wordt gereserveerd voor het totale waterverlies naar de atmosfeer per eenheid van grondoppervlak; 'evaporatie',  $E_s$ , voor het waterverlies van kale grond;  $E_o$ , voor een vrij wateroppervlak; en 'transpiratie',  $T$ , voor het waterverlies door een plantendek.

In de praktijk wordt de relatie produktie - watergebruik dikwijls op verschillende manieren geïnterpreteerd. Zo wordt totale droge stofproduktie vaak uitgezet tegen evapotranspiratie, transpiratie, hoeveelheid toegediend irrigatie- of beregeningswater, beschikbaar bodemvocht, of beschikbaar bodemvocht + neerslag + watergift, etc. Daarbij worden dan allerlei soorten verbanden gevonden die moeilijk generaliseerbaar zijn. Hetzelfde geldt in sterke mate wanneer een gedeelte van de droge stofproduktie, het uiteindelijk geoogste produkt (b.v. graan, aardappels), tegen genoemde variabelen wordt uitgezet. Een moeilijkheid daarbij is dat een nauwkeurige vaststelling van bijvoorbeeld evapotranspiratie (waterverlies door gewas + grond!) of effectieve watergift onder veldomstandigheden veel problemen geeft. Dit houdt in dat in de literatuur relatief weinig goede experimenten beschreven zijn waarbij òn de produktie òn het watergebruik met voldoende nauwkeurigheid zijn gemeten.

In het vervolg wordt allereerst ingegaan op resultaten van veldproeven waar produktiefuncties nauwkeurig bepaald zijn. Daarna wordt aandacht geschonken aan formules die op een min of meer fysische afleiding van de relatie produktie - watergebruik berusten.

##### a. R e s u l t a t e n v a n v e l d p r o e v e n

Ten einde een methodologie te ontwikkelen om gewasopbrengsten te voorspellen onder verschillende bodemvocht- en zoutomstandigheden,



zijn onder andere in de USA op 4 plaatsen (Davis, Fort Collins, Logan en Yuma) gelijksoortige onderzoeken gedaan naar de effecten van irrigatieregimes en verzouting op de opbrengst van mais (STEWART e.a. 1977). In de fig. 4 tot 7, die betrekking hebben op de veldproeven in Davis zijn de belangrijkste resultaten en tendenties weergegeven.

In fig. 7 is de totale droge stofproduktie van mais uitgezet tegen de evapotranspiratie gedurende het groeiseizoen van velden die een verschillende irrigatieregime en waterkwaliteitsbehandeling hebben ondergaan. Op het nul-object (III - WQ<sub>0</sub>) werd een regressie-analyse toegepast, resulterend in de getrokken lijn van fig. 7.

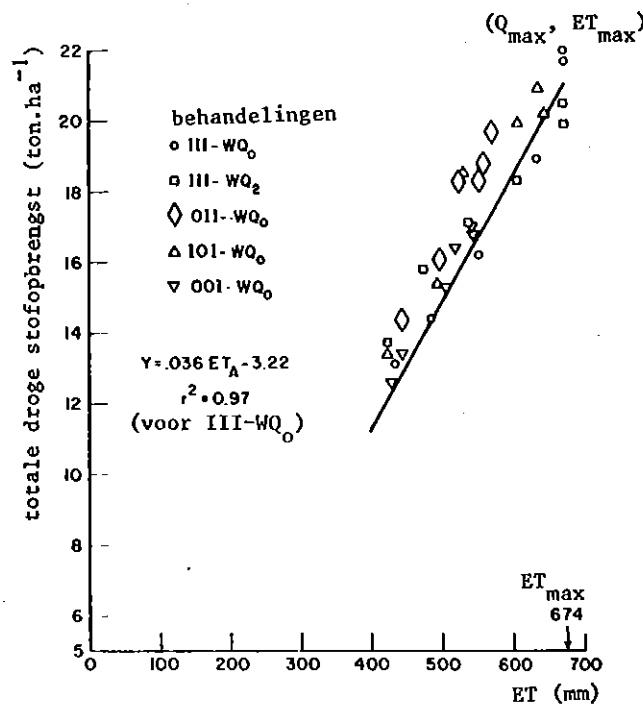


Fig. 7. Droge stofopbrengst van mais in Davis in 1974 als functie van de totale evapotranspiratie gedurende het groeiseizoen bij verschillende irrigatieregimes en waterkwaliteit. Irrigatieregime III geeft aan dat voldoende water werd gegeven gedurende alle groeistadia. De variant 101 betekent dat voldoende water werd gegeven gedurende groeistadium 1 (vegetatief) en groeistadium 3 (afrijping) maar niet tijdens groeistadium 2 (bloei). Zo betekent 001 dat alleen water werd gegeven gedurende groeistadium 3. Water van goede kwaliteit is aangeduid met WQ<sub>0</sub> (nul-object), water van slechte kwaliteit met WQ<sub>2</sub>, i.e. geleidbaarheid van 2 mmhos.cm<sup>-1</sup> (naar Stewart e.a., 1977)

Deze lijn heeft een variantie ( $r^2$ ) die inhoudt dat 97% van de variatie in totale droge stofproductie verklaard wordt door veranderingen in evapotranspiratie. De regressiecoëfficiënt (0,036) geeft een produktierespons van 36 kg droge stof per ha-mm evapotranspiratie. Uit fig. 7 blijkt verder dat bij ieder evapotranspiratieniveau alle irrigatieregimes dezelfde droge stofopbrengsten geven.

Dit geldt tevens voor de verschillende zoutbehandelingen. Een en ander leidt tot de conclusie dat noch het tijdstip van de irrigatie, noch de zoutfactoren de droge stofproductie beïnvloeden. Het is duidelijk dat het primaire effect van het zout is dat de wateropname door het gewas wordt gereduceerd en wel op dezelfde manier als een watertekort zou doen.

In fig. 8 is de korrelopbrengst uitgezet tegen de evapotranspiratie. Ook hier zien we, net als in fig. 7, een sterk lineair verband ( $r^2 = 0,98$ ). Het achterwege laten van een irrigatiegift in de bloeiperiode (I0I) resulteert in een relatief grotere reductie in graanopbrengst dan in droge stofproductie.

Uit de fig. 7 en 8 blijkt dat het verlengde van de lijnen niet

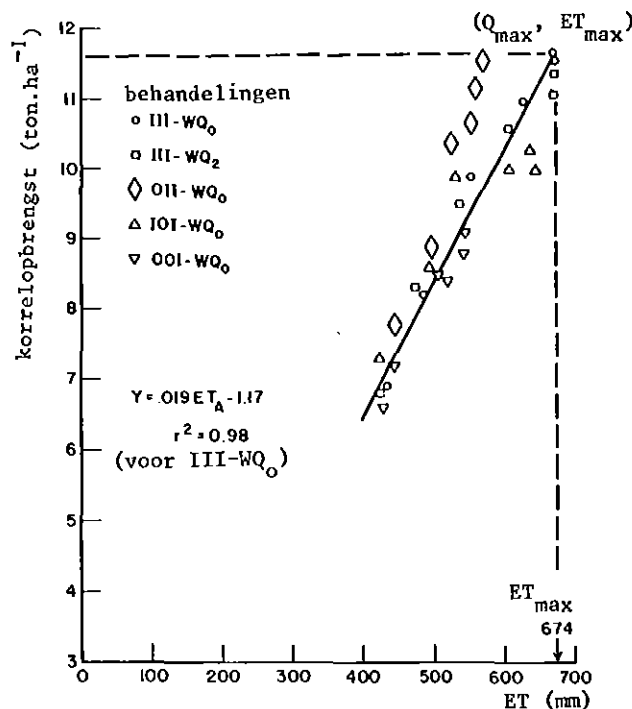


Fig. 8. Als fig. 7, maar dan voor de korrelopbrengst (naar Stewart e.a., 1977)

door de oorsprong gaat (let op dat verticale as niet bij 0 begint!). Het snijpunt van de lijn met de horizontale as geeft de evaporatie, welke voornamelijk optreedt in het begin van het groeiseizoen. Als oorsprong van genoemde regressielijnen zou kunnen gelden dat punt waar het evapotranspiratiedeficit nul is, dus het punt ( $Q_{\max}$ ,  $ET_{\max}$ ). Dit punt (zie fig. 8) zal daar liggen waar de laagste ET-waarde overeen komt met de maximum opbrengst. De helling van de lijn is dan alleen afhankelijk van de gewasvariëteit. Wanneer de functie relatief wordt gemaakt (d.w.z.  $Q_{\max}$  en  $ET_{\max}$  worden gelijk aan 100 gesteld) dan zal de relatieve helling  $\Delta Q_{\max} / \Delta ET_{\max}$  een constante zijn voor iedere variëteit.

Behalve de geciteerde 'lineaire' resultaten van Davis zijn ook duidelijk niet-lineaire verbanden in de literatuur aangetoond. Proeven van STEWART en HAGAN (1969) met bijvoorbeeld wintertarwe geven een duidelijk convex verband aan (initieel een grote helling die later afneemt). Dit geldt zowel voor de absolute als relatieve functies. Een voorbeeld van de laatste is weergegeven in fig. 9, waar de relatieve graanproductie is uitgezet tegen de relatieve evapotranspiratie.

STEWART en HAGAN (1969) tonen een concaaf verband aan voor alfalfa, dat wil zeggen een toenemende efficiëntie van het waterverbruik totdat een maximum is bereikt (fig. 10). Dit is hierdoor te verklaren dat de Q-ET relaties verschillend zijn voor voorjaar, zomer en herfst. Als gevolg van de cyclische opslag van fotosynthese producten worden deze in de herfst in de wortels en in het voorjaar in de top opgeslagen. De effectiviteit van het watergebruik is dus hoog in het voorjaar, normaal in de zomer en laag in de herfst.

Bovenstaande voorbeelden tonen aan hoe voorzichtig men moet zijn met het generaliseren van productiefuncties zonder specifieke veldstudies met verschillende gewastypen en variëteiten.

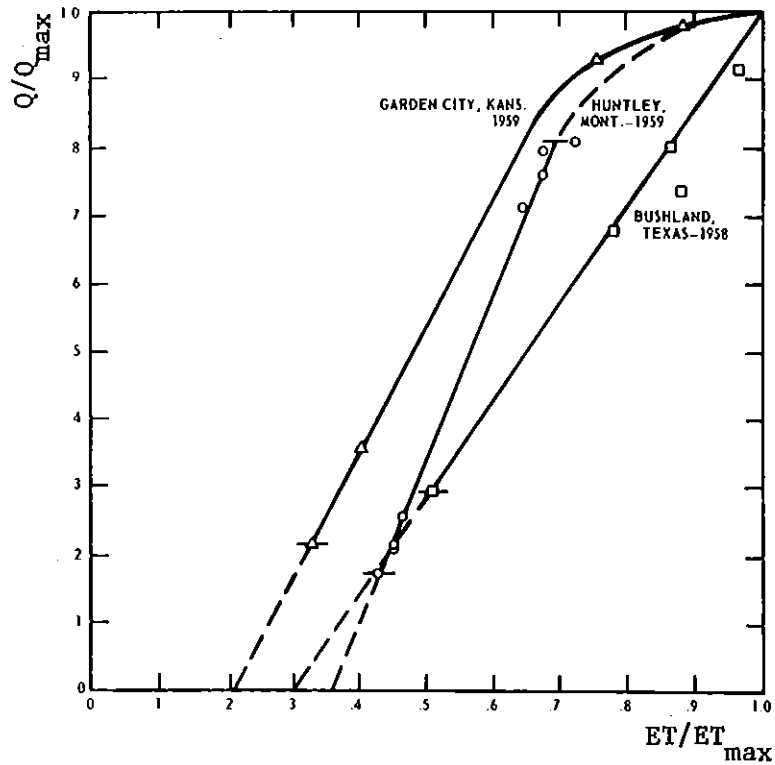


Fig. 9. Relatieve produktie als funktie van de relatieve evapotranspiratie voor wintertarwe voor een 3-tal plaatsen in de USA (naar Stewart en Hagan, 1969)

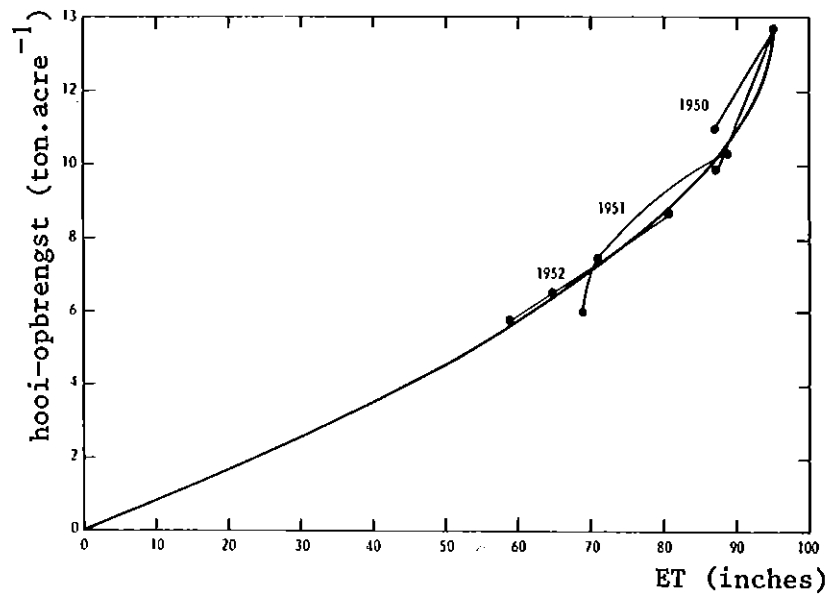


Fig. 10. Hooi-opbrengst van alfalfa in Yuma in 1950-1952 als funktie van de evapotranspiratie (naar Stewart en Hagan, 1969)

Keren we nu terug naar de Davis resultaten betreffende mais. In fig. 11 is de totale droge stofproduktie van fig. 7 uitgezet tegen de watergift (met inbegrip van natuurlijke neerslag). Het blijkt dat iedere behandeling resulteert in een gelijkwaardige produktierespons tot een zeker maximum voor de bewuste variant is bereikt. Hierna neemt de opbrengst niet meer toe of zelfs af wanneer te veel water is gegeven. Dit in sterk contrast met fig. 7 waar de produktie toeneemt zo lang de evapotranspiratie toeneemt. Dus de produktieplafonds in fig. 11 duiden de hoeveelheid irrigatiewater aan waarboven geen contributie meer aan de evapotranspiratie wordt geleverd. Extra water geven betekent slechts verspilling. Wat verder opvalt is dat hoewel verzouting de relatie droge stofproduktie - evapotranspiratie niet beïnvloedt (zie fig. 7), er op verzoute grond wel een reductie in vermogen is om hoge produkties te leveren.

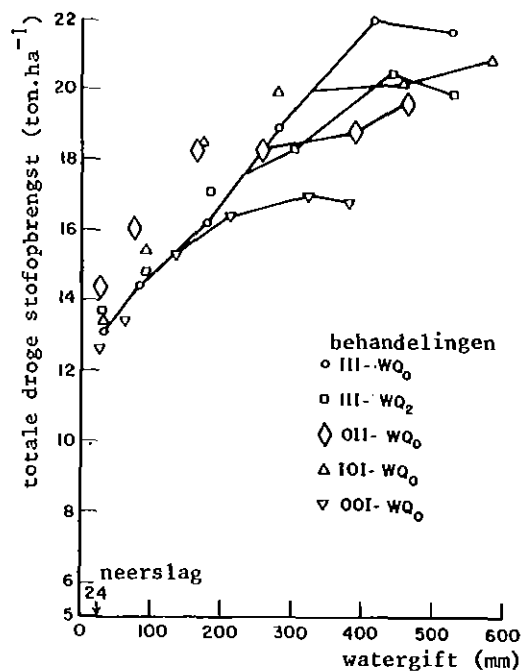


Fig. 11. Als fig. 7, maar dan voor de hoeveelheid toegediend water (naar Stewart e.a., 1977)

In fig. 12 is de korrelopbrengst uitgezet tegen de hoeveelheid toegediend water. We zien min of meer dezelfde effecten als in fig. 11.

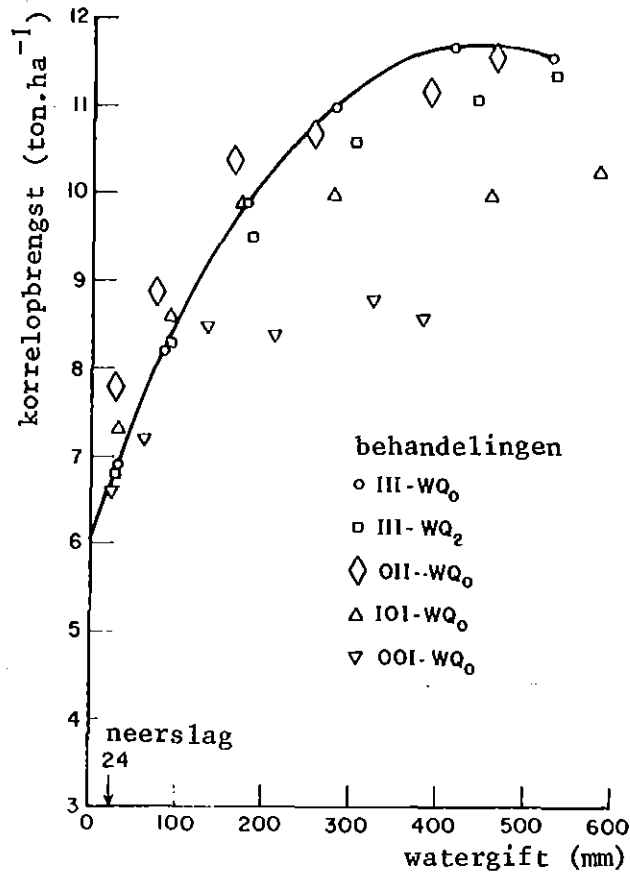


Fig. 12. Als fig. 11, maar dan voor de korrelopbrengst (naar Stewart e.a., 1977)

Voor de 00I-behandeling treedt het plateau voor de graanproductie al op bij 100 mm (fig. 12), voor de totale droge stofproductie pas bij 200 mm (fig. 11). Voor de IOI-behandeling zijn deze getallen respectievelijk 200 en 300 mm. De convexe vormen van de produktiefuncties van fig. 11 en 12 zijn typerend voor deze wijze van grafische voorstelling. Wanneer alle water voor verdamping wordt gebruikt, dat wil zeggen wanneer er 100% irrigatie-efficiëntie is, dan worden de lineaire relaties van respectievelijk fig. 7 en 8 benaderd. Wordt meer water gegeven dan voor verdamping nodig is, dan gaat een deel verloren door wegzijging naar de ondergrond of een hoeveelheid water zal achterblijven in de bodem wanneer het gewas geoogst wordt.

Dezelfde soort verbanden krijgen we als we de droge stofproductie bijvoorbeeld uitzetten tegen de totale hoeveelheid beschikbaar water. Deze hoeveelheid (THW) kan worden gedefinieerd als de som van de hoeveelheid bodemwater (BW) plus de neerslag (N) plus de irrigatiegift (I) plus de capillaire opstijging (C) uit het grondwater

$$\text{THW} = \text{BW} + \text{N} + \text{I} + \text{C} \quad (\text{mm}) \quad (17)$$

Een voorbeeld hiervan wordt gegeven door RIJTEMA (1969). Deze zet de droge stofproductie van gras uit tegen de ('maximale') hoeveelheid water die beschikbaar is gedurende het groeiseizoen (THW) voor onder andere het jaar 1960 voor verschillende profielen en grondwaterstands- diepten (fig. 13). Hierbij definieert hij voor BW dat de wortelzone vanaf veldcapaciteit tot  $pF = 4.2$  mag uitdrogen en voor C dat de onderkant van de wortelzone gemiddeld op  $pF = 3$  wordt gehouden. FEDDES (1971) bepaalde de hoeveelheid bodemwater (B) die in een groeiperio- de voor de verdamping beschikbaar is voor groentegewassen door uit te gaan van een voor maximale produktie toelaatbare uitdrogingswaar- de in de wortelzone van  $pF = 2,6$ . Voor de berekening van C gaat hij uit van een gemiddelde  $pF = 2,35$  aan de onderkant van de wortelzone. In fig. 14 zijn de versgewichtopbrengsten van aardappels zoals geme- ten op een 3-tal bodemprofielen gedurende 4 jaren uitgezet tegen THW. De minimale hoeveelheid water die voor een maximale produktie nood- zakelijk is, blijkt 310 mm te bedragen, een waarde die goed overeen- komt met uit de literatuur afgeleide gegevens.

Uit de fig. 13 en 14 blijkt dat hoewel THW zeer verschillend ge- definieerd werd globaal genomen gelijkvormige reacties worden waar- genomen: links van de optimale THW is er watertekort, rechts ervan wateroverlast, resulterend in zuurstofgebrek in de wortelzone.

Bovenstaande beschouwingen mogen duidelijk maken dat er essen- tiële verschillen bestaan tussen het uitzetten van opbrengst versus evapotranspiratie of opbrengst versus 'beschikbaar water' (in de ruimste zin van het woord). Alleen wanneer al het water echt gebruikt wordt voor verdamping, dan zullen beide relaties elkaar benaderen. In de praktijk wordt verdamping vaak uit de waterbalans geschat. Men dient er dan rekening mee te houden dat fouten van 10 à 20% geen uit- zondering zijn.

Wat betreft het bepalen van de 'effektieve' beregeningsgift, dat wil zeggen de hoeveelheid water die het gewas ten goede komt, moet vaak een zeer ruwe schatting voor percolatieverliezen naar de

droge stofopbrengst  
 (ton.ha<sup>-1</sup>)

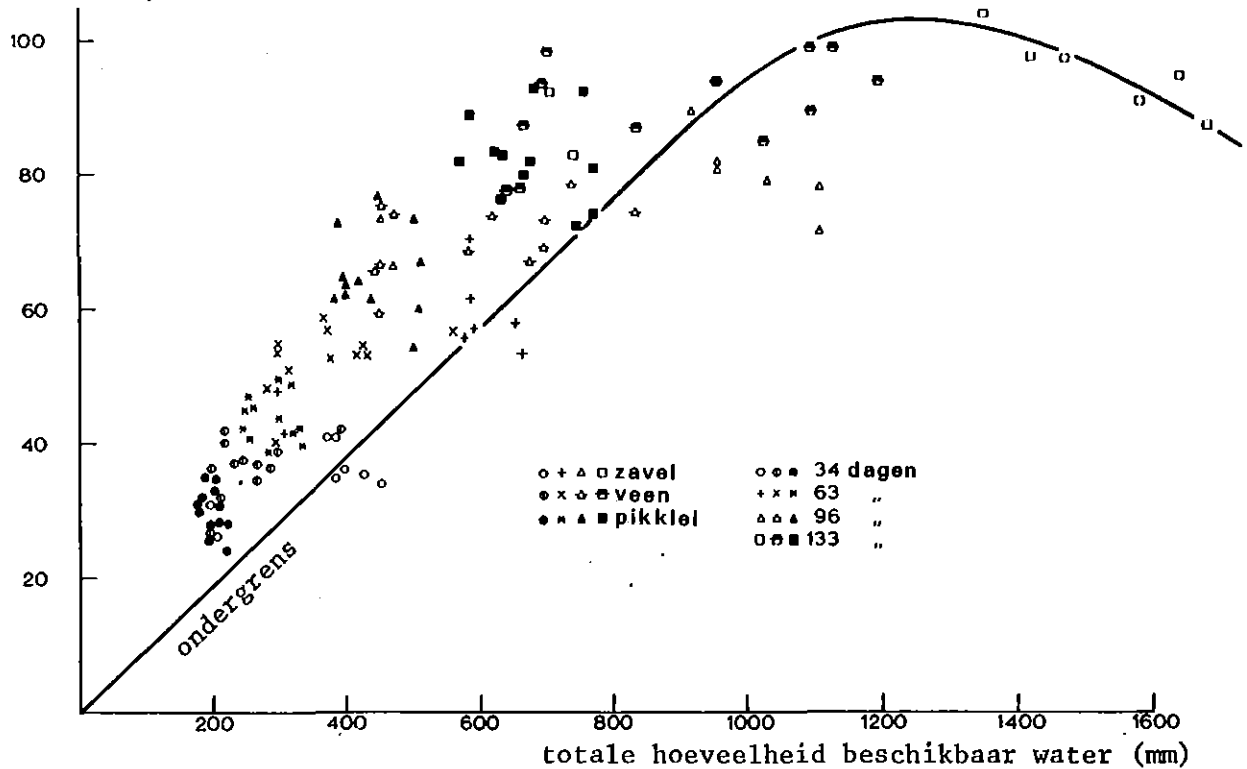


Fig. 13. Droge stofproductie van gras in 1960 op een 3-tal bodemprofielen als functie van de 'maximale hoeveelheid beschikbaar water' (naar Rijtema, 1969)

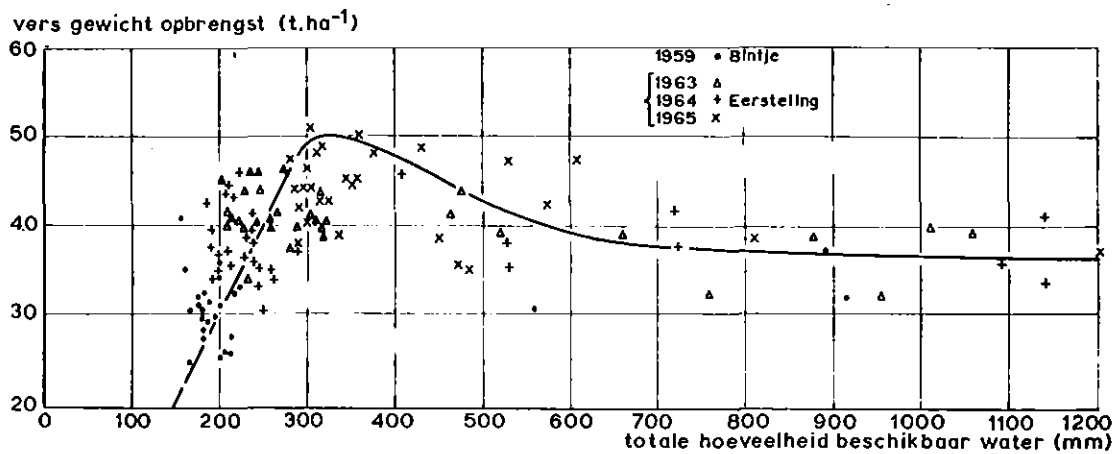


Fig. 14. Vers gewicht opbrengst van aardappelen gedurende de jaren 1959, 1963-1965 op het grondwaterstandenproefveld Geestmerambacht als functie van de 'beschikbare hoeveelheid water' (naar Feddes, 1971)



ondergrond worden gemaakt. Fouten hierin werken direct door in de kilogrammen droge stof die per mm regengift kunnen worden gehaald, en zo in beschouwingen over het economisch rendement van beregening.

#### b. F y s i s c h g e o r i ë n t e e r d e m o d e l l e n

Uit de hier aangehaalde veldproeven blijkt dat niet altijd even eenduidige verbanden tussen opbrengst en watergebruik kunnen worden gehaald. Ten einde meer systematiek in een en ander te brengen kunnen we het beste uitgaan van modellen die een fysische achtergrond hebben. Dat zijn de volgende.

P r o d u k t i e - t r a n s p i r a t i e m o d e l. Uit fig. 1 is duidelijk gebleken dat groeisnelheid en produktie evenredig zijn met de hoeveelheid groeifactor die door de plant worden opgenomen. Dus wat betreft de faktor water kunnen we stellen dat opbrengst recht-evenredig is met de hoeveelheid water gebruikt door het gewas, i.e. de totale transpiratie (verg. met lijn 2 fig. 6)

$$Q = A_1 T_{\text{tot}} \quad (18)$$

waarin  $Q$  in  $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$  en de cumulatieve transpiratie  $T_{\text{tot}}$  in mm. Dit levert voor  $A_1$  eenheden van  $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{mm}^{-1}$ . STANHILL (1960) heeft laten zien dat voor gras de helling  $A_1$  afhangt van het klimaat en dat deze zich wijzigt met de breedtegraad. DE WIT (1958) vond dat verg. (18) geldt voor gematigde klimaten. Hij geeft, gebaseerd op proeven in Nederland, de volgende waarden voor  $A_1$ : haver 26, suikerbiet 61, erwten 34  $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{mm}^{-1}$ . De Wit duidt verder aan dat de waarde van  $A_1$  niet of in slechts geringe mate afhangt van de leeftijd van de plant. Door verg. (18) te differentiëren ontstaat

$$\frac{dQ}{dt} = A_1 \frac{d T_{\text{tot}}}{dt} \quad (19)$$

dat meer algemeen kan worden geschreven als

$$\dot{q} = A_1 T \quad (20)$$

waarin  $\dot{q}$  de groeisnelheid is ( $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{dag}^{-1}$ ) en T de transpiratiesnelheid van het gewas ( $\text{mm} \cdot \text{dag}^{-1}$ ). De conclusie is dus dat er meer of minder dezelfde relatie bestaat tussen  $\dot{q}$  en T als tussen Q en  $T_{\text{tot}}$ .

DE WIT (1958) stipuleerde dat voor aride gebieden produktie en transpiratie gerelateerd kunnen worden volgens

$$Q = A_2 \frac{T_{\text{tot}}}{E_o} \quad (21)$$

waarin  $E_o$  de verdampingssnelheid van een open wateroppervlak gemeten met een class A-pan is ( $\text{mm} \cdot \text{dag}^{-1}$ ), en een maat is voor de zonnestraalingsintensiteit (i.e. de transpiratievraag van de atmosfeer). In verg. (21) heeft  $A_2$  de dimensie van  $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{dag}^{-1}$ . De Wit vond voor tarwe dat  $A_2 = 115$ , voor sorghum  $A_2 = 207$  en voor alfalfa  $A_2 = 55 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{dag}^{-1}$ . RIJTEMA (1969) heeft alfalfa data, verzameld door DE WIT (1958), uitgezet volgens verg. (21). In fig. 15 zijn de resultaten weergegeven. Bij een tekort aan de groeifactor water is er een recht-evenredige toename te zien van de produktie met  $T_{\text{tot}}/E_o$ . Komt een andere groeifactor in het minimum (in dit geval de bemestingstoestand van de grond) dan wordt een produktieplafond geschapen. Dit plafond ligt verschillend voor de diverse plaatsen (vergelijk dit met de fig. 1 en 2!).

P r o d u k t i e - t r a n s p i r a t i e s n e l h e i d /  
 d a m p d r u k d e f i c i t. Aangezien de tot dusver besproken produktie - transpiratie relaties verschillend lijken te zijn voor humide en aride gebieden op dezelfde breedtegraad, hebben BIERHUIZEN en SLATYER (1965) een andere relatie voorgesteld waarin het dampdrukdeficit van de lucht is opgenomen.

Deze relatie kan worden geschreven als:

$$\dot{q} = A \frac{T}{\Delta e} \quad (22)$$

waarin  $\dot{q}$  de dimensie heeft van  $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{dag}^{-1}$ , T van  $\text{mm} \cdot \text{dag}^{-1}$  en  $\Delta e$  van mbar en A dus van  $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{mbar}$ . Klimaatgebieden die een verschillende  $\Delta e$  vertonen zullen verschillende waarden voor  $\dot{q}$  geven

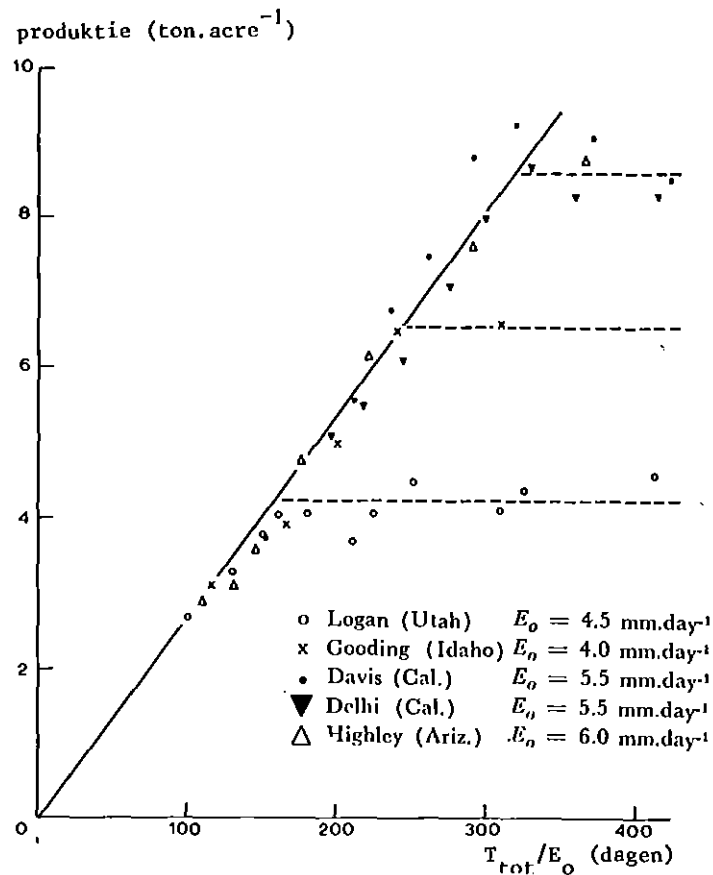


Fig. 15. Hooiproductie van alfalfa als functie van de verhouding totale transpiratie  $E_{pl}^{tot}$ /verdampingssnelheid open water,  $E_o$  volgens gegevens van De Wit (1968) en als bewerkt door Rijtema (1969). Verschillen in productieplafonds worden veroorzaakt door verschillen in bemesting

bij dezelfde  $T$ .

Voor een aantal waarden van  $A$  voor diverse gewassen, zie tabel 5 van FEDDES e.a. (1978).

Door RIJTEMA (1969) is verg. (22) toegepast op gras. Hij vindt enigszins kromlijnige (concave) verbanden, die echter zonder bezwaar als lineair kunnen worden geïnterpreteerd. RIJTEMA en ENDRÖDI (1970) laten voor totale droge stofproducties van aardappelen over verschillende jaren zien dat toepassing van een vergelijking van het type (22) de voorkeur verdient boven verg. (18) omdat verschillen in opbrengst als gevolg van meteorologische verschillen gedurende de diverse jaren zo worden weggewerkt. Door FEDDES (1971) zijn op-

brengsten van rode kool, stamslabonen en selderij volgens verg. (25) geanalyseerd. Door SLABBERS e.a. (1978) wordt gesuggereerd dat de helling A verschilt voor verschillende klimaatsomstandigheden. Dit zou inhouden dat A hoger is voor een droog jaar dan voor een nat jaar.

**M o d e l C R O P R.** Door FEDDES e.a. (1978) is de invloed van de groeifactor water  $w$  op de produktiesnelheid beschouwd volgens verg. (22). In verg. (15) geldt dus per definitie dat

$$w = \frac{T}{\Delta e} \quad (23)$$

De werkelijke groeisnelheid voor een willekeurige dag  $i$  in de groeiperiode kan dan worden geschreven als:

$$\dot{q}_{act}^i = \frac{A}{2} \frac{T^i}{\Delta e^i} + \frac{\dot{q}_{pot}^i}{2} - \frac{1}{2} \left[ (\dot{q}_{pot}^i + A \frac{T^i}{\Delta e^i})^2 - 4 \dot{q}_{pot}^i A \frac{T^i}{\Delta e^i} (1 - \xi) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (24)$$

Deze hyperbolische curve wordt begrensd door 2 asymptoten (fig. 6) voor  $\xi \rightarrow 0$ ,  $\dot{q}_{act} \rightarrow A \frac{T}{\Delta e}$  en  $\dot{q}_{act} \rightarrow \dot{q}_{pot}$ . In dit verband wordt nog eens gewezen naar de gelijkvormigheid van fig. 6 en verg. (24) met fig. 15, waarin (cumulatieve) produktie versus (cumulatieve) transpiratie gedeeld door open waterverdamping is weergegeven. In feite kunnen we zeggen dat  $E_o$  vergelijkbaar is met  $\Delta e$ : beide factoren geven de verdampingsvraag van de atmosfeer weer. Tevens is al opgemerkt dat ongeveer dezelfde relatie bestaat tussen  $Q$  en  $T_{tot}/\Delta e$  als tussen  $\dot{q}$  en  $T/\Delta e$ . In fig. 16 zijn de resultaten weergegeven van dag voor dag berekeningen met verg. (24) voor het aardappelgewas Bintje dat gedurende het droge jaar 1976 werd geteeld in Oost-Flevoland. Het blijkt dat met dit model aktuele opbrengsten redelijk goed kunnen worden voorspeld. De werkelijke transpiratie is bij dit experiment berekend met een apart model, SWATR (voor details zie FEDDES e.a., 1978).

Fig. 17 geeft de resultaten weer voor op twee bodemprofielen in Polen gedurende het natte jaar 1972, waarin geen vochttekorten op-

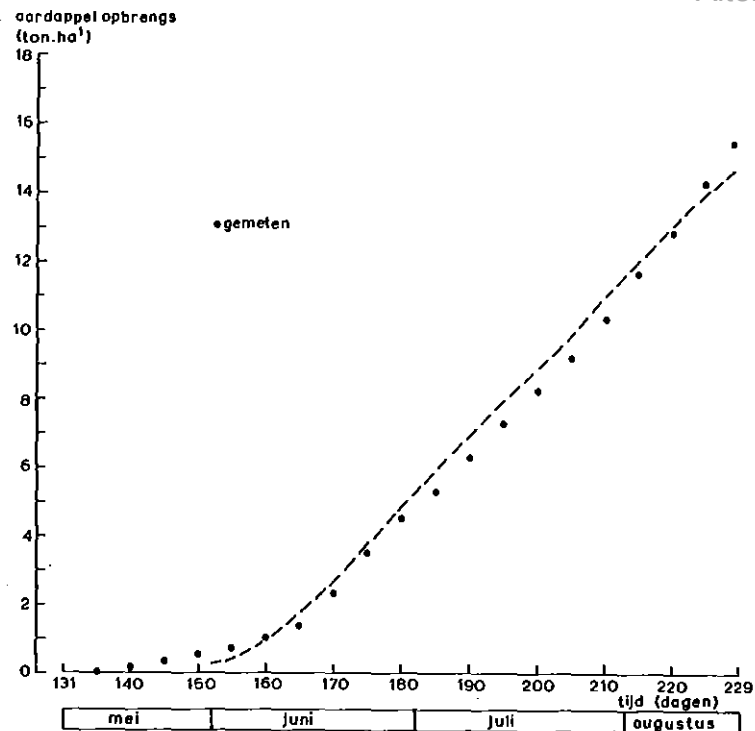


Fig. 16. Vergelijking van de gemeten droge stofopbrengst met de volgens verg. (24) gesimuleerde resultaten voor een aardappelgewas op zavel in Oost-Flevoland in het jaar 1976 (naar Feddes e.a., 1978)

traden. De berekende (in dit geval potentiële) opbrengst komt goed overeen met de op beide profielen gemeten waarden.

**Productie-weerstandmodel.** Het weerstandenmodel volgens verg. (10) is door RIJTEMA en ABOUKHALED (1975) uitgebreid. Aannemende dat de totale evapotranspiratie gedurende een groeiseizoen van  $t$  dagen kan worden geschreven als

$$ET_{\text{tot}} = \left( \frac{\epsilon \rho_a}{p_a} \frac{\overline{\Delta e}}{\overline{r_a} + \overline{r_s}} \right) \cdot t \quad (25)$$

en de totale droge stofproductie analoog aan verg. (19) vereenvoudigd mag worden tot

$$P_{\text{tot}} = \left( \frac{490}{\overline{r_a} + 1,8\overline{r_s} + r'_m} \cdot \overline{P_{st}} \cdot \overline{\alpha_{ph}} \cdot \overline{S_c} \right) \cdot t \quad (26)$$

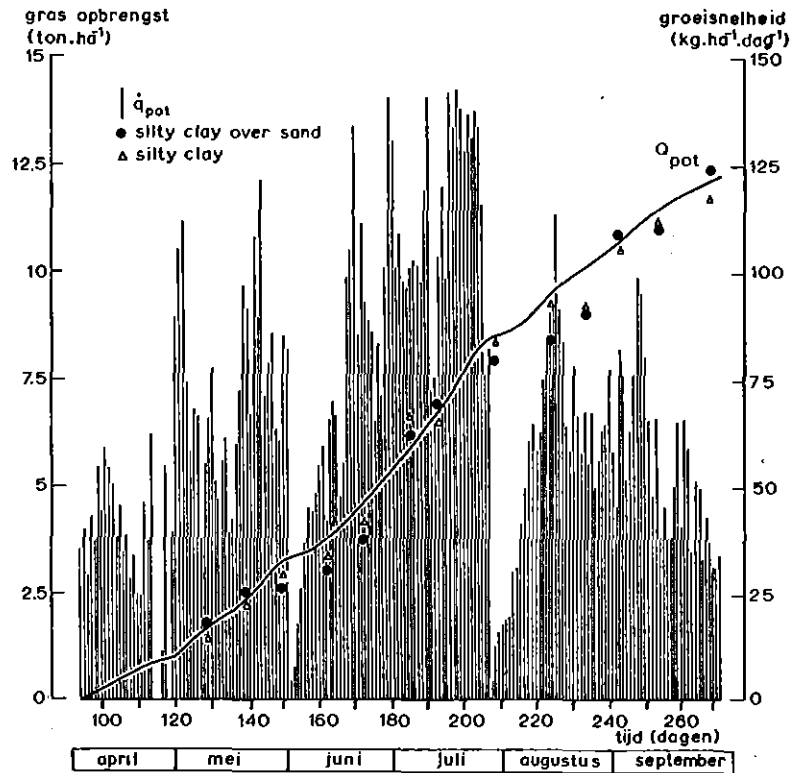


Fig. 17. Vergelijking van de gemeten (potentiële) droge stofopbrengst met de volgens verg. (24) gesimuleerde resultaten voor gras in Polen in 1972 op twee verschillende profielen. De verticale lijnen geven de potentiële groeisnelheid  $\dot{q}_{pot}$  weer (naar Feddes e.a., 1978)

waarin met gemiddelde waarden van de diverse grootheden over het seizoen wordt gewerkt, krijgen we door t uit verg. (25) op te lossen en in verg. (26) te substitueren:

$$P_{tot} = \frac{p_a}{\epsilon \rho_a} \frac{490(\bar{r}_a + \bar{r}_s)}{\bar{r}_a + 1,8\bar{r}_s + r'_m} \cdot \bar{P}_{st} \cdot \bar{\alpha}_{ph} \cdot \bar{S}_c \cdot \frac{ET_{tot}}{\Delta e} \quad (\text{kg.ha}^{-1}) \quad (28)$$

De moeilijkheid van toepassing van verg. (27) zit vooral in het bepalen van de grootte van de diverse weerstanden.

L i n e a i r p r o d u k t i e m o d e l. Door ervan uit te gaan dat de verhouding van de weerstanden in verg. (27) een constante is voor een bepaald gewas, en door verder de onder par. II.c genoemde factoren voor temperatuur  $\alpha_T$  en de fraktie aan geoogst produkt  $\beta_h$  in te voeren komen SLABBERS e.a. (1978) tot de volgende formulering:

$$P_{tot} = K \cdot P_{st} \cdot \alpha_{ph} \cdot \alpha_T \cdot \beta_h \cdot \frac{ET_{tot}}{\Delta e} \quad (\text{kg.ha}^{-1}) \quad (28)$$

Toetsing door SLABBERS e.a. (1978) van verg. (28), (27) en (24) aan gegevens betreffende de gewassen alfalfa, sorghum en mais laten zien dat de drie genoemde modellen (met enige door laatstgenoemde auteurs geïntroduceerde modificaties en aanpassingen) elkaar qua resultaat niet veel ontlopen.

R e l a t i e v e p r o d u k t i e - r e l a t i e v e t r a n s -  
 p i r a t i e. Analoog aan verg. (18) kan men voor condities van potentiële totale transpiratie schrijven

$$Q_{pot} = A_1^* T_{tot}^* \quad (29)$$

Deling van verg. (18) door verg. (29) geeft de relatieve produktie versus de relatieve transpiratie

$$\frac{Q}{Q_{pot}} = B \frac{T_{tot}}{T_{tot}^*} \quad (30)$$

waarin  $B = 1$  als  $A_1 = A_1^*$ . Op analoge wijze kan men ook afleiden uit bijvoorbeeld verg. (20) dat de relatieve produktiesnelheid versus de relatieve transpiratiesnelheid kan worden geschreven als

$$\frac{\dot{q}}{q_{pot}} = B \frac{T}{T^*} \quad (31)$$

Het voordeel van het gebruik van dergelijke dimensieloze vergelijkingen is dat verschillen tussen jaren met verschillende produktie- en verdampingsniveaus worden weggewerkt. De gegevens voor gras van RIJTEMA (1969; fig. 7g) zijn door RIJTEMA (1971) omgewerkt tot

een vergelijking van het type (30). Ook hier wordt door genoemde auteur een lichtelijk concaaf verband aangehouden, hetgeen echter zonder veel bezwaar weer als lineair kan worden geïnterpreteerd. STEWART e.a. (1973) noemen voor mais  $B = 1,26$  en voor sorghum  $B = 0,98$ .

Toepassing van verg. (30) houdt in dat geen specifieke droogte-gevoelige stadia bij een gewas voorkomen.

Een variant van verg. (30) wordt verkregen door impliciet aan te nemen dat  $B = 1$ , zodat

$$Q = \frac{T_{\text{tot}}}{T_{\text{tot}}^*} \cdot Q_{\text{pot}} \quad (32)$$

welke in de USA bekend staat als het 'Hanks model'. HANKS (1974) rapporteert goede resultaten voor droge stofproducties van sorghum en droge stof- en graanproducties van mais. STEWART e.a. (1978) melden voor mais eveneens goede resultaten.

Voor gewassen die verschillende effecten van vochttekorten gedurende de verschillende fysiologische groeistadia vertonen, kan niet volstaan worden met een simpele relatie als verg. (32). HANKS (1973) stelde daarom voor om voor de korrelproductie van mais te gebruiken

$$\frac{Q_{\text{korrel}}}{Q_{\text{pot}}} = \left( \frac{T_{\text{tot}}}{T_{\text{tot}}^*} \right)_1^{\lambda_1} \left( \frac{T_{\text{tot}}}{T_{\text{tot}}^*} \right)_2^{\lambda_2} \dots \left( \frac{T_{\text{tot}}}{T_{\text{tot}}^*} \right)_5^{\lambda_5} \quad (33)$$

waarin de indices 1, ..., 5 betrekking hebben op verschillende groeistadia en  $\lambda_1 \dots \lambda_5$  wegingsfactoren zijn, variërend met die groeistadia. STEWART e.a. (1977) rapporteren echter dat voor mais met verg. (33) in het algemeen geen betere resultaten worden verkregen dan met verg. (32), zodat het gebruik van verg. (32) in zo'n geval de voorkeur verdient.

Relatieve produktie - relatieve evapotranspiratie. Dit model gaat uit van de grootst mogelijke produktie bij ieder evapotranspiratieniveau, variërend van  $Q = Q_{\text{pot}}$  bij  $ET = ET_{\text{pot}}$  (de oorsprong van de funktie) en lineair afnemend



voor  $ET < ET_{pot}$ . Dit model is in de USA bekend als Stewart's model. Het lineaire verband met ET geldt zowel voor totale droge stofproductie als bijvoorbeeld graanopbrengst wanneer water tenminste de limiterende factor is. De vergelijking luidt (STEWART e.a., 1977):

$$\left(1 - \frac{Q}{Q_{pot}}\right) = \beta_0 \left(1 - \frac{ET}{ET_{pot}}\right) \quad (34)$$

waarin  $\beta_0$  de dimensieloze helling is. Anders geschreven luidt deze lineaire funktie

$$\frac{Q}{Q_{pot}} = 1 - \beta_0 + \beta_0 \frac{ET}{ET_{pot}} \quad (35)$$

STEWART e.a. (1977) vonden voor mais in Davis  $\beta$ -waarden variërend van 0,29 tot 1,29 voor totale droge stofproductie en van 1,03 tot 1,72 voor de graanproductie. Genoemde auteurs hebben ook een aanvullend model voor gewassen met droogetegevoelige stadia ontwikkeld, gebruik makend van verschillende gevoeligheidsfactoren voor de diverse groeistadia.

Het voordeel van het gebruik van een formulering als verg. (35) is dat men het begrip evapotranspiratie gebruikt en geen scheiding hoeft te maken tussen transpiratie en evaporatie.

De in de Commissie Waterhuishouding Gelderland gebruikte produktie-verdampingsrelaties zijn samengevat in tabel 2.

Tabel 2. Produktie-verdampingsrelaties gebruikt bij het onderzoek in het kader van de Commissie Waterhuishouding Gelderland zoals afgeleid uit gegevens van RIJTEMA (1971). Produkties zijn in t.ha<sup>-1</sup>.

Gewas	Relatie	Vochtspanningsgrens cm
Aardappels	$Q = 58,1 \left( \frac{ET}{ET_{pot}} \right) - 16,0$	
Granen		
korrel	$Q = 5,1 \left( \frac{ET}{ET_{pot}} \right) - 0,6$	$\psi \leq 600$
	$Q = 3,7 \left( \frac{ET}{ET_{pot}} \right) - 0,4$	$\psi \geq 1600$
stro	$Q = 8,1 \left( \frac{ET}{ET_{pot}} \right) - 1,8$	$\psi \leq 600$
	$Q = 9,5 \left( \frac{ET}{ET_{pot}} \right) - 2,0$	$\psi \geq 1600$
Gras	$Q = 13,5 \left( \frac{ET}{ET_{pot}} \right)^2$	

## V. SAMENVATTING EN AANBEVELINGEN

Ten einde effecten van de waterhuishouding via de verdamping op de gewasproductie te kunnen evalueren, is een aantal productiefuncties ontwikkeld. Deze geven het verband weer tussen de droge stofproductie van een gewas en het watergebruik. Dit laatste kan op verschillende manieren worden gedefinieerd, zoals: evapotranspiratie, transpiratie, water (beregening)-gift, 'beschikbaar' water, etc.

In hoofdstuk II wordt ingegaan op de berekening van de potentiële productie, dat wil zeggen de maximaal mogelijke productie van een gewas onder de heersende klimaatomstandigheden bij een optimale voorziening van water en voedingsstoffen.

In hoofdstuk III worden enige modellen besproken die de werkelijke productie van een gewas berekenen.

Hoofdstuk IV is in twee gedeelten gesplitst: eerst worden de resultaten van veldproeven besproken in afhankelijkheid van evapotranspiratie, watergift en hoeveelheid 'beschikbaar' water. Vervolgens worden aan de hand van fysische formuleringen/afleidingen enige modellen toegelicht die op verschillende manieren het watergebruik in beschouwing nemen. Vergelijkingen van modelresultaten met werkelijk gemeten waarden worden gegeven.

Een en ander overziende kan worden gesteld dat in Nederland dringend behoefte bestaat aan kwantitatieve gegevens tussen productie en watergebruik. Uit vroegere lysimeteronderzoeken en andere waterbalansstudies zijn wel relaties voor een aantal gewassen bekend, maar het is zeer de vraag of bij de huidige hoge bemestingsgiften, toepassing van andere rassen, variëteiten en dergelijke deze relaties nog wel gelden.

Toepassing van modellen die de effecten van verschillen in waterhuishouding op de productie van een bepaald gewas evalueren vereist de bekendheid van het verband productie - watergebruik. Deze producties dienen in zorgvuldige veldproeven met de huidige hoge bemestingsgiften te worden gemeten, waarbij het watergebruik met behulp van nauwkeurige waterbalansstudies dient te worden vastgesteld. Te denken valt bijvoorbeeld aan een proefopzet zoals toegepast door STEWART e.a. (1977) met een beregeningsbuis die een grote dichtheid

aan sproeiders bezit: in de direkte omgeving van de buis wordt de maximale verdamping en de maximale produktie bereikt, naarmate men verder van de buis verwijderd is nemen deze af totdat een basis-niveau is bereikt. De vochtgehalten worden op regelmatige afstand van de buis gemeten. Fig. 18 geeft een indruk van de werkwijze en de variatie die in het watergebruik en de produktie hiermede kan worden verkregen. Deze methode zou vooral toegepast kunnen worden in gebieden met een diepe grondwaterspiegel, waar de capillaire opstijging vanuit het grondwater te verwaarlozen is. In gebieden met een hoge grondwaterspiegel dient deze component met behulp van bijvoorbeeld lysimeters van het type zoals beschreven door FEDDES (1971) te worden bepaald. (Beregeningsproeven waarbij maar een slag wordt geslagen naar percolatieverliezen/capillaire opstijging dienen ernstig te worden ont-raden). In het algemeen dient, meer dan vroeger, aandacht te worden geschonken aan de effecten van watertekorten tijdens de droogtegevoelige perioden van een gewas.

Een andere methode om vochtverschillen te creëren is het werken met een persput. De grondwaterstand is het hoogst bij de put en wordt naarmate men verder van de put verwijderd is. Op verschillende afstanden van de put kunnen dan neutronen/gammabuizen worden geplaatst, de vochtbalansen gemeten en gewasopbrengsten worden bepaald.

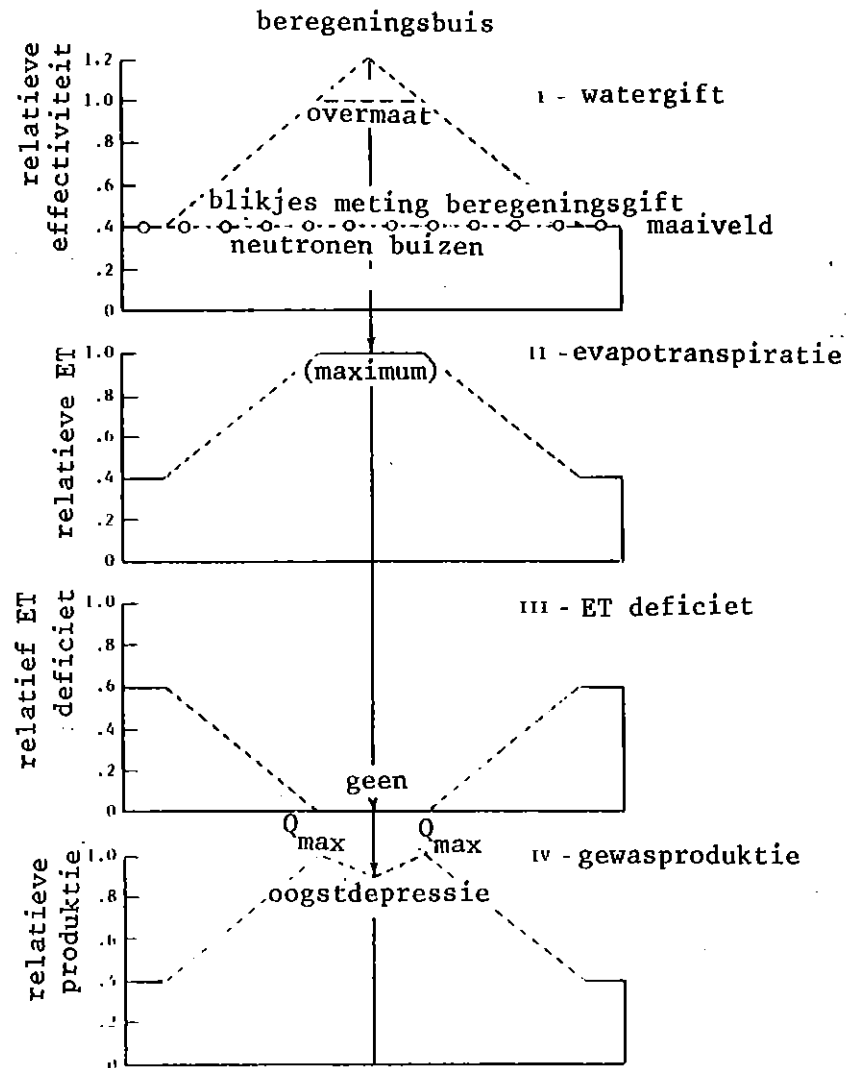


Fig. 18. Schematische weergave van de verdeling van toegediend water, evapotranspiratie, evapotranspiratiedeficiet en gewasproductie als functie van de afstand tot een met een dicht net van sproeidoppen bezette beregeningsbuis (naar Stewart e.a., 1977)

LITERATUUR

- BIERHUIZEN, J.F. and R.O. SLATYER, 1965. Effect of atmospheric concentration of water vapor and CO<sub>2</sub> in determining transpiration-photosynthesis relationships of cotton leaves. *Agric. Meteor.* 2: 259-270.
- DOORENBOS, J. and W.O. PRUITT, 1977. Crop water requirements. FAO Irrig. and Drainage Paper 24. FAO, ROME: 144.
- FEDDES, R.A., 1971. Water, heat and crop growth. Dissertatie, Landbouwhogeschool, Wageningen 71-12: 184.
- , P.J. KOWALIK and H. ZARADNY, 1978. Simulation of field water use and crop yield. Simulation Monograph. ISBN 90-220-0676 - X PUDOC, Wageningen: 189.
- GAASTRA, P., 1963. Climatic control of photosynthesis and respiration. In: *Environm. contr. of plant growth* (Ed. E.T. Evans). Acad. Press, New York: 113-140.
- RIJTEMA, P.E., 1969. On the relation between transpiration, soil physical properties and crop production as a basis for water supply plans. *Versl. Med. Cie. Hydr. Onderz. TNO* 15: 28-58.
- 1971. Een berekeningsmethode voor de benadering van de landbouwschade tengevolge van grondwateronttrekking. *Nota ICW* 587.
- and G. ENDRÖDI, 1970. Calculation of production of potatoes. *Neth. J. Agric. Sci.* 18.1: 26-36.
- and A. ABOUKHALED, 1975. Crop water use. In: *Research on crop water use, salt affected soils and drainage in the Arab Rep. of Egypt*. FAO, Rome: 5-57.
- RYHINER, A.H. and M. MATSUDA, 1978. Effect of plant density and water supply on wheat production. *Neth. J. Agric.* 26: 200-209.
- SIBMA, L., 1968. Growth of closed green crop surfaces in the Netherlands. *Neth. J. Agric. Sci.* 16.4: 211-216.
- SLABBERS, P.J., V. SORBELLO HERRENDORF and M. STAPPER, 1978. Water-crop-yield relationships. *Agric. Water Manag.* (in press).
- STANDHILL, G., 1960. The relationship between climate and the transpiration and growth of pastures. *Proc. 8th Intern. Grassland Congress.*

- STEWART, J.I. and R.M. HAGAN, 1969. Predicting effects of water shortage on crop yield. J. Irr. and Drain. Div., Vol. 95(1): 91-104.
- , R.M. HAGAN, W.O. PRUITT and W.A. HALL, 1973. Water production functions and irrigation programming for greater economy in project and irrigation system design and for increased efficiency in water use US Dept. of the Interior. Bur. of Recl., Engineering and Research Center, Denver. Report 14-06-D-7329: 164.
- et al., 1977. Optimizing crop production through control of water and salinity levels in the soil. Report PRWG 151-1 Utah Water Res. Lab., Utah State Univ., Logan: 191.
- WIT, C.T. DE, 1958. Transpiration and crop yields. Versl. Landbouwk. Onderz. 64.6 PUDOC, Wageningen: 88.
- 1978. Een elementair model van gewasgroei. Landbouwk. Tijdschr. 90-8a: 275-281.
- e.a., 1978. Simulation of assimilation, respiration and transpiration of crops. Simulation Monograph, PUDOC, Wageningen: 141.

LIJST VAN GEBRUIKTE SYMBOLEN

Symbool	Verklaring	Dimensie
A	Efficiëntie watergebruik	$M^2.L^{-4}.T^{-2}$
$C_Q, C_z$	CO <sub>2</sub> -concentratie binnen respectievelijk buiten het blad	$M.L^{-3}$
E, E*	Werkelijke en potentiële bodemverdampingssnelheid	$L.t^{-1}$
$E_o$	Verdampingssnelheid open water	$L.t^{-1}$
ET, ET*	Werkelijke en potentiële evapotranspiratiesnelheid	$L.t^{-1}$
ET <sub>tot</sub>	Totale evapotranspiratie	L.
e	Waterdampdruk	$M.L^{-1}.t^{-2}$
$P_c, P_o, P_{st}$	Bruto fotosynthesesnelheid van een 'standaardgewas' op respectievelijk heldere, bewolkte en arbitraire dagen	$M.L^{-2}.t^{-1}$
P <sub>tot</sub>	Totale droge stofproduktie (boven- + ondergronds)	$M.L^{-2}$
P	Produktiesnelheid totale droge stof (boven- + ondergronds)	$M.L^{-2}.t^{-1}$
p <sub>a</sub>	Atmosferische druk	$M.L^{-1}$
Q <sub>act</sub> , Q <sub>pot</sub>	Werkelijke en potentiële droge stofopbrengst (oogstbaar produkt)	$M.L^{-2}$
q̇ <sub>act</sub> , q̇ <sub>pot</sub>	Werkelijke en potentiële produktiesnelheid (oogstbaar produkt)	$M.L^{-2}.t^{-1}$
R, R <sub>c</sub>	Kortgolvlige stralingsflux (0,4-0,7 μm) op respectievelijk werkelijke en heldere dagen	$M.t^{-3}$
r <sub>a</sub>	Aerodynamische diffusieweerstand van de luchtlaag rondom de bladeren	$t.L^{-1}$
r <sub>s</sub>	Diffusieweerstand van de stomata van bodem en gewas	$t.L^{-1}$
r' <sub>m</sub>	Diffusieweerstand voor het CO <sub>2</sub> -transport van de mesofylcellen	$t.L^{-1}$



Symbool	Verklaring	Dimensie
$S_c$	Fractie bodembedekking	-
$T, T^*$	Werkelijke en potentiële transpiratiesnelheid	$L.t^{-1}$
$T_{tot}, T_{tot}^*$	Totale werkelijke en potentiële transpiratie	L
w	Groefactor water	-
$\alpha_{ph}$	Reduktiefactor voor droge stofproductie	-
$\alpha_T$	Parameter voor effect van temperatuur op de groei van een gewas	-
$\beta_h$	Verhouding van geoogste deel tot de totale plant	-
$\epsilon$	Verhouding moleculair gewicht van waterdamp en droge lucht	$M.L^{-1}.t^{-2}.T^{-1}$
$\Lambda$	Fractie bewolking	-
$\xi$	Mathematische flexibiliteitsconstante in groeivergelijking	-
$\rho_a$	Dichtheid van vochtige lucht	$M.L^{-3}$
$\phi_r$	Reduktiefactor voor ademhalingsverliezen	-