

NN31545.0794

NOTA 794

februari 1974

Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding
Wageningen

BIBLIOTHEEK DE HAAFF

Droevendaalsesteeg 3a
Postbus 241
6700 AE Wageningen

PRODUKTIE EN VERDAMPING IN DE MODERNE BODEMKUNDE

P. E. Rijtema

(voordracht gehouden in 1972 te Wageningen voor de 28ste B-leer-
gang 'De bodemkunde in de moderne land- en tuinbouw)

BIBLIOTHEEK
STARINGGEBOUW

Nota's van het Instituut zijn in principe interne communicatiemidde-
len, 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.

CENTRALE LANDBOUWCATALOGUS



0000 0334 7578

1789380

PRODUKTIE EN VERDAMPING IN DE MODERNE BODEMKUNDE

P.E.Rijtema

Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding, Wageningen

1. Inleiding

De bepaling van de waterbehoefte van gewassen en de daarmee samenhangende bepaling van de produktiemogelijkheden is afhankelijk van meteorologische, plantenfysiologische en bodemfysische aspecten. De ontwikkeling van het onderzoek op dit gebied is echter zodanig, dat velen, niet direct bij het onderzoek betrokkenen, vaak de indruk hebben dat het meer gaat om het oplossen van een academische problematiek, dan dat met de verkregen resultaten door bodemkundigen in de praktijk zou kunnen worden gewerkt.

Vergelijkt men de sterk fysisch-mathematische ontwikkeling op het gebied van het verdampings- en produktie-onderzoek met het toch vaak meer gevoelsmatige en empirisch gerichte bodemkundige onderzoek, dan lijkt hier een bijna niet te overbruggen kloof tussen beide vakgebieden te bestaan.

De ontwikkeling van modellen voor de toepassing van het verdampings-onderzoek in hydrologische studies, maakt het noodzakelijk dat voor de berekening van de verdamping vereenvoudigde schematiseringen moeten worden toegepast, waardoor het mogelijk wordt de voor de bodemkundige in het terrein te herkennen en te beschrijven grootheden zoals effectieve wortelingsdiepte, bodemprofieltype, gemiddeld hoogste en gemiddeld laagste grondwaterstanden in zulke kwantitatieve modellen op te nemen.

In het kader van mijn voordracht, zal ik me echter beperken tot de kwantitatieve aspecten die het waterverbruik door en de produktie van gewassen bepalen. Slechts zeer summier zal worden ingegaan op de koppeling van verdampings- en produktiemodellen in hydrologische studies. Voor een meer uitgebreide behandeling hiervan moet worden verwezen naar enkele recente rapporten (RIJTEMA, 1971, 1973)

2. Verdamping

De verdamping van een vrij wateroppervlak is behalve van de specifieke eigenschappen van de watermassa, alleen afhankelijk van meteorologische factoren. De verdamping van een begroeide grond is behalve van deze meteorologische factoren ook afhankelijk van de ontwikkeling van het gewas, de

fysiologische eigenschappen van het gewas en van de waterhuishouding van de grond waarop het gewas groeit.

Het was vooral door het onderzoek van PENMAN (1948) naar de verdamping van een vrij wateroppervlak, dat het praktisch toegepaste kwantitatieve verdampingsonderzoek een belangrijke ontwikkeling doormaakte. Hoewel voor de berekening van de gewasverdamping in die tijd van empirisch te bepalen reductiefactoren gebruik moest worden gemaakt heeft het zeer lang geduurd voordat een verdere ontwikkeling in de praktisch toepasbare berekening van de gewasverdamping tot stand kwam. De noodzaak hiertoe was duidelijk aanwezig, omdat onder veel omstandigheden de werkelijke verdamping van het gewas geen direct eenduidig verband met de verdamping van een vrij wateroppervlak heeft. Bij de huidige beschouwingen van de werkelijke verdamping van het gewas, zijn in het verdampingsmodel dan ook een groot aantal factoren van belang. De voornaamste factoren zijn:

- de energie beschikbaar voor de verdamping van water;
- het waterdamptransport van het verdampend oppervlak naar hoger gelegen luchtlagen;
- de geometrie van het verdampend oppervlak;
- de opening van de huidmondjes in verband met het waterdamptransport van de intercellulaire holten naar de externe atmosfeer;
- de wateraanvoer naar het verdampend oppervlak.

De beschikbare energie en het waterdamptransport naar de hoger gelegen luchtlagen zijn afhankelijk van de meteorologische omstandigheden die ook de verdamping van een wateroppervlak beheersen, hoewel er verschillen zijn in reflectie en de ruwheid van het verdampend oppervlak. De geometrie van het verdampend oppervlak is sterk afhankelijk van de ontwikkeling van het gewas, terwijl de opening van de huidmondjes en de wateraanvoer naar het verdampend oppervlak afhankelijk zijn van plantenfysiologische en bodemfysische eigenschappen.

Aangezien elk van de genoemde factoren de verdamping van een begroeide grond mede bepaalt, is het noodzakelijk dat zij bij de berekening van de verdamping in beschouwing worden genomen. Vooral in perioden met een gereduceerde verdamping ten gevolge van vochttekorten of lage stralingsintensiteit, kan de grootte van de verdamping in belangrijke mate worden beïnvloed door de interceptie van de neerslag. In een publikatie (RIJTEMA, 1965) werd reeds een benadering gegeven voor een berekening waarmee het effect op de verdamping met voldoende nauwkeurigheid kon worden bepaald.

2.1. Meteorologische factoren

Verdamping is de overgang van de vloeibare fase naar de dampfase waarvoor een zekere hoeveelheid energie nodig is. Het probleem bij de energiebalans is het meten van alle andere termen van de balans, waarbij de verdamping als restterm overblijft. Bij verwaarlozing van de energie gebruikt voor de fotosynthese en de warmteberging in het gewas kan deze balans als volgt worden weergegeven:

$$H_{nt} = (1 - r) H_{sh} - {}^{nt}H_{l0} = LE + K + S \quad (1)$$

hierin is H_{nt} de nettostraling, H_{sh} de totale kortgolvlige zonne- en hemelstraling, ${}^{nt}H_{l0}$ de netto langgolvlige straling, LE de energie verbruikt voor de verdamping, K de warmte-afgifte naar de atmosfeer ten gevolge van temperatuurgradiënten, S de warmte-afgifte naar de grond, r de reflectie-coëfficiënt van het oppervlak voor de kortgolvlige straling en L de verdampingswarmte.

In balansperioden van een aantal dagen wordt de warmteberging in de grond relatief zeer klein ten opzichte van de nettostraling, waardoor onder deze omstandigheden deze term in de energiebalans mag worden verwaarloosd. Het probleem wordt dan teruggebracht tot het scheiden van de twee overblijvende termen in het rechterlid. Aangezien beide termen te maken hebben met het transport van energie in de turbulent bewegende lucht, kan de verdeling van de netto energie over beide componenten tot stand worden gebracht met behulp van de Bowlerverhouding

$$\beta = \frac{K}{LE} = \gamma \frac{T_s - T_a}{e_s - e_a} \quad (2)$$

hierin is γ de psychrometerconstante, T_s en T_a respectievelijk de oppervlakte- en luchttemperatuur, e_s en e_a respectievelijk de dampspanning aan het verdampend oppervlak en in de lucht. Bij berekeningen waarbij alleen wordt gebruik gemaakt van de energiebalans is het dus noodzakelijk om gradiënten in temperatuur en dampspanning boven het verdampend oppervlak te meten, waardoor deze methode voor praktische toepassing minder geschikt is.

Naast de energiebalans wordt de verdamping mede bepaald door het transport van waterdamp van het verdampend oppervlak naar hoger gelegen luchtlagen. Dit transport wordt beheerst door de dampspanningsgradiënt,

de turbulentie van de luchtstroom en de ruwheid van het verdampend oppervlak. De verdamping kan met een eenvoudige transportvergelijking worden weergegeven (RIJTEMA, 1966)

$$E = f(z_o d) u^{0,75} (e_s - e_a) \quad (3)$$

hierin is $f(z_o d)$ de ruwheidsfunctie van het gewas, u de windsnelheid op 2 m hoogte in $m.sec^{-1}$, e_s en e_a de dampspanning respectievelijk op het oppervlak en op twee meter hoogte. Ook bij deze transportvergelijking is het weer noodzakelijk om gradiënten boven het verdampend oppervlak te meten, waardoor deze methode ook niet voor praktische toepassing geschikt is.

Door het invoeren van de helling (Δ) van de temperatuur-dampspanningscurve werd door PENMAN (1948) voor een vrij wateroppervlak een vergelijking ontwikkeld waarin beide methoden zodanig werden gecombineerd, dat van routine meteorologische gegevens gebruik kon worden gemaakt. Wordt het gewasoppervlak als een nat oppervlak beschouwd, dan kan voor dit oppervlak dezelfde combinatie tot stand worden gebracht, waarmede dan de maximaal mogelijke verdamping van het gewasoppervlak kan worden berekend. Deze vergelijking is als volgt:

$$E_{nat} = \frac{\Delta H_{nt}/L + \gamma f(z_o d) u^{0,75} (\epsilon_a - e_a)}{\Delta + \gamma} \quad (4)$$

hierin is E_{nat} de maximale verdamping van het oppervlak, H_{nt}/L de netto straling in $mm.dag^{-1}$, Δ de helling van de temperatuur-dampspanningscurve, ϵ_a de verzadigde dampspanning bij luchttemperatuur. De andere variabelen hebben de reeds eerder aangegeven betekenis.

Voor die omstandigheden dat het verdampend oppervlak niet als een nat oppervlak mag worden beschouwd is door RIJTEMA (1965) een gewasmodel ontwikkeld, waarbij door invoering van de diffusieweerstand r_c van het gewas, de door Penman gevolgde procedure toch weer kon worden toegepast. Dit leidt tot de volgende vergelijking voor de werkelijke verdamping van een gewasoppervlak.

$$E_{re} = \frac{\Delta H_{nt}/L + \gamma f(z_o d) u^{0,75} (\epsilon_a + e_a)}{\Delta + \gamma \left\{ 1 + f(z_o d) u^{0,75} r_c \right\}} \quad (5)$$

Door ENDRODI en RIJTEMA (1969) werden de vergelijkingen (4) en (5) gecombineerd, waarbij tevens de door RIJTEMA (1965) geïntroduceerde correctieterm voor het verdampingsverhogend effect van de neerslaginterceptie mede in beschouwing werd genomen. Dit leidt tot de volgende vergelijking, waarbij de toe te passen reductiefactor voor niet optimale verdampingsomstandigheden fysisch is gedefinieerd.

$$E_{re} = \frac{\Delta + \gamma}{\Delta + \gamma (1 + f(z_0 d) u^{0,75} r_c)} (E_{nat} - E_I) + E_I \quad (6)$$

In deze vergelijking is E_I de verdamping van de neerslaginterceptie door het gewas uitgedrukt in mm dag^{-1} , waarbij voor E_I de voorwaarde geldt $E_I \leq E_{nat}$

Aangezien de verdampingsvergelijking nu meteorologisch bepaald is, is het noodzakelijk om aan de andere factoren de nodige aandacht te schenken.

2.2. De geometrie van het verdampend oppervlak

De invloed van de geometrie van het verdampend oppervlak komt het duidelijkst tot uiting bij de teelt van éénjarige gewassen. In een groeiseizoen ontwikkelt het gewas zich van een aantal kleine kiemplantjes met een zeer geringe bodembedekking, tot volledig uitgegroeide planten met een volledige bodembedekking. Voor de geometrie van het verdampend oppervlak zijn dus twee aspecten van groot belang, namelijk de gewashoogte en de bodembedekking. De gewashoogte heeft alleen invloed op de gewasruwheid en daardoor op de transportcoëfficiënt $f(z_0 d) u^{0,75}$. Het door RIJTEMA (1965) bepaalde verband tussen gewashoogte en ruwheidsfunctie $f(z_0 d)$ werd bij het onderzoek van SLABBERS (1969) met sterk uiteenlopende gewassen in aride gebieden bevestigd. Ook door FEDDES (1971) werd voor verschillende tuinbouwgewassen een bevestiging van deze waarden gevonden. Het verband tussen de gewashoogte en de ruwheidsfunctie is weergegeven in tabel 1. Tevens zijn in deze tabel de waarden van $u^{0,75}$ gegeven voor verschillende windsnelheden. De waarde van $f(z_0 d) u^{0,75}$ is dan gegeven in $\text{mm.dag}^{-1} \cdot \text{mbar}^{-1}$.

De gegevens in tabel 1 kunnen direct worden gebruikt als het dampspanningsdeficiet is uitgedrukt in mbar. Wanneer het verzadigingsdeficiet is uitgedrukt in mm H_g , moeten de gegeven waarden van $f(z_0 d)$ worden gedeeld door 0,75.

Tabel 1. Het verband tussen gewashoogte en de ruwheidsfunctie $f(z_0 d)$, alsmede tussen de windsnelheid op twee meter hoogte en $u^{0,75}$

gewashoogte(cm)	0	5	10	20	30	40	50	60	70	80	90
$f(z_0 d)$ (mm.dag ⁻¹ mbar ⁻¹)	0,15	0,39	0,60	0,80	0,90	0,98	1,05	1,11	1,17	1,21	1,24
u (m.sec ⁻¹)	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	5,0	6,0	7,0
$u^{0,75}$	0,59	1,00	1,35	1,68	1,99	2,28	2,56	2,80	3,34	3,84	4,31

De invloed van de bodembedekking op de verdampingssnelheid is sterk afhankelijk van de vochtomstandigheden in de toplaag. Bij natte bodemomstandigheden wordt de reducerende invloed van de bodembedekking op de verdamping vrijwel geheel gecompenseerd door de verdamping van de kale grond. Bij toenemende uitdroging van de grond neemt de invloed van de bodembedekking op de verdamping toe. Dit effect kan worden weergegeven op basis van de diffusieweerstand r_c van het verdampend oppervlak. De waarde van r_c is afhankelijk van de bodembedekking blijkt praktisch onafhankelijk te zijn van het type gewas (RIJTEMA, 1966; FEDDES, 1971). Voor praktische toepassing kunnen de in tabel 2 gegeven waarden worden gebruikt.

Tabel 2. Het verband tussen r_c in mbar dag mm⁻¹ en de bodembedekkingsfractie voor 2 vochttoestanden van de toplaag

Vochtconditie toplaag	Bodembedekkingsfractie											
	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	
matig droog	4,48	3,11	2,30	1,69	1,21	0,80	0,46	0,25	0,11	0,00	0,00	
droog	9,46	6,31	4,48	3,17	2,28	1,58	1,05	0,55	0,23	0,11	0,00	

Wanneer wordt gewerkt met een dampspanningsdeficiet op basis van mm Hg moeten de gegeven waarden worden vermenigvuldigd met 0,75. Bij omstandigheden met een natte toplaag kan de verdamping worden benaderd met de vergelijking

$$E = \frac{\Delta + \gamma}{\Delta + \gamma \left\{ 1 + f(z_0 d) u^{0,75} r_c \right\}} E_{nat} + \left\{ 1 - \frac{\Delta + \gamma}{\Delta + \gamma \left\{ 1 + f(z_0 d) u^{0,75} r_c \right\}} \right\} E_s \quad (7)$$

waarbij E_s de verdamping van natte kale grond is, terwijl voor r_c de waarden uit tabel 2 worden gebruikt, die gelden voor een droge toplaag.

2.3 F y s i o l o g i s c h e e i g e n s c h a p p e n v a n h e t g e w a s

De waarde van de verdamping is naast de reeds besproken factoren ook afhankelijk van de fysiologische eigenschappen van het gewas. De feitelijke omzetting van water in waterdamp vindt plaats in de intercellulaire holten van het blad, zodat bij de verdamping een diffusie van waterdamp optreedt door de huidmondjes van het blad. Een effectieve regeling van de verdamping door het gewas kan alleen geschieden door middel van de openingstoestand van de huidmondjes. Uit de plantenfysiologische literatuur (GAASTRA, 1959; KUIPER, 1961) blijkt dat de openingstoestand wordt bepaald door de interne CO_2 -concentratie in het blad, die sterk afhankelijk is van de lichtintensiteit en door de zuigspanning in het bladweefsel.

Uit het onderzoek van RIJTEMA (1965) blijkt, dat voor veldgewassen een relatie bestaat tussen de diffusieweerstand van het gewas en de gemiddelde stralingsintensiteit gedurende de daglichturen. Deze relatie is weergegeven in tabel 3.

Tabel 3. Het verband tussen de diffusieweerstand r_c in $mbar \text{ dag} \cdot mm^{-1}$ en de gemiddelde stralingsintensiteit in $cal \cdot cm^{-2} \cdot min^{-1}$

Stralingsintensiteit ($cal \cdot cm^{-2} \cdot min^{-1}$)	0,10	0,25	0,20	0,25	0,30	0,35	≥ 0,38
r_c ($mbar \text{ dag} \cdot mm^{-1}$)	5,03	3,68	2,59	1,61	0,88	0,15	0,0

Uit de gegevens van tabel 3 volgt, dat bij de onder de weersomstandigheden in Nederland voorkomende stralingsintensiteiten gedurende het groeiseizoen op ongeveer 33% van het aantal groeidagen lichtbeperkingen voor volledige huidmondjesopening voorkomen. Vaak wordt dit effect niet in de verdamping teruggevonden, omdat dit tevens dagen zijn waarop het gewas nat is ten gevolge van neerslag. Dit aspect is echter wel van belang bij het later te behandelen produktiemodel.

Bij optredende vochttekorten regelt het gewas zijn interne waterbalans door het sluiten van de huidmondjes in afhankelijkheid van de vochtpotentiaal in het blad. De waarde van de bladpotentiaal waarbij het gewas door een reactie van de huidmondjes de verdamping begint te reguleren verschilt van gewas tot gewas. De bekende gegevens van een aantal gewassen zijn als voorbeeld gegeven in tabel 4.

Tabel 4. Vochtpotentiaal in bars in het blad van enkele gewassen waarbij de verdamping begint te reduceren

Gewas	Vochtpotentiaal in blad (bar)	Auteur
katoen	-13	Ehlig en Gardner (1964)
klaver	-10	Ehlig en Gardner (1964)
gras	-10	Rijtema (1965)
graan	-10	Rijtema en Ryhiner (1966)
zonnebloem	- 7,5	Ehlig en Gardner (1964)
peper	- 3,5	Ehlig en Gardner (1964)
aardappel	- 3,5	Endrödi en Rijtema (1969)

Uit tabel 4 blijkt dat de mate van droogtegevoeligheid voor verschillende gewassen sterk uiteenloopt. Zo kan een gewas als katoen zonder dat reductie in verdamping optreedt een grond verder uitdrogen dan aardappelen. Daar staat echter tegenover dat de overlevingskans van aardappelen in perioden met droogte groter is doordat dit gewas zuiniger met water omgaat dan katoen.

2.4. Bodemeigenschappen en verdamping

Studies betreffende de wateropname door het gewas (GARDNER, 1960; RIJTEMA, 1965, 1966; ENDRODI en RIJTEMA, 1969) hebben aangetoond dat het verband tussen de vochtpotentiaal in het blad, de verdamping en bodemfysische omstandigheden kan worden weergegeven door de algemene vergelijking

$$\psi_1 = - E (r_{pl} + b/k) + \psi_s \quad (8)$$

Hierin is:

ψ_1 de vochtpotentiaal in het blad in bars

E de verdamping in mm.dag^{-1}

r_{pl} de gewasweerstand voor watertransport van het worteloppervlak naar de intercellulaire holten in bar dag.mm^{-1}

b een geometriefactor van het wortelsysteem in bars

ψ_s de gemiddelde vochtpotentiaal in de wortelzone in bars

k het capillair geleidingsvermogen in mm.dag^{-1} bij de gemiddelde vochtpotentiaal ψ_s

De geometriefactor b is afhankelijk van de bewortelingsintensiteit en de bewortelingsdiepte (GARDNER, 1960). Door het combineren van gegevens voor verschillende gewassen werd door FEDDES en RIJTEMA (1972) aangetoond dat de bewortelingsdiepte de overheersende factor is die de waarde van b bepaalt. Voor praktische doeleinden kan de geometriefactor b onafhankelijk van het type gewas worden benaderd door

$$b = 0,01275 z^{-1} \quad (9)$$

waarbij z de effectieve bewortelingsdiepte van het gewas in cm is. Voor een bespreking van profieleigenschappen en effectieve bewortelingsdiepte kan in het kader van deze cursus worden verwezen naar VAN DER SLUYS (1973).

Door FEDDES en RIJTEMA (1972) werd aangetoond dat de waarde van r_{pl} toeneemt naarmate de wortelzone van het gewas verder uitdroogt. De voornaamste reden voor dit verschijnsel is de wijziging in het vochtopnamepatroon in de wortelzone van het gewas. Onder natte omstandigheden vindt de grootste onttrekking plaats in de bovenste lagen van de wortelzone, terwijl bij voortgaande uitdroging de zone met grootste wateropname zich naar diepere lagen in de wortelzone verplaatst. Zowel door het geringere aantal wortels en mogelijk kleinere wortelactiviteit, alsmede door de langere transportweg door de plant, neemt de waarde van r_{pl} bij uitdroging van de wortelzone toe. Het aantal beschikbare gegevens voor verschillende gewassen is echter zeer beperkt. Gebaseerd op de gegevens van FEDDES en RIJTEMA (1972) kan als eerste zeer grove benadering van de relatie tussen r_{pl} en de vochtpotentialiaal in de wortelzone worden gegeven:

$$r_{pl} = 0,763 \ln (-\psi_s) + 1,493 \quad (10)$$

Voor de bepaling van het capillair geleidingsvermogen k en de vochtpotentialiaal ψ kan gebruik worden gemaakt van de door RIJTEMA (1969) gegeven waarden voor een reeks standaardgronden.

Met behulp van de vergelijkingen (8), (9) en (10) is de bladpotentialiaal uit te drukken in de termen verdamping en bodemvochtpotentialiaal en via de vocht karakteristiek in het vochtgehalte in de wortelzone. Met behulp van vergelijking (8) kan voor verschillende gewastypen worden berekend onder welke omstandigheden reducties in de verdamping beginnen op te treden. Tevens kan door gebruikmaking van de door RIJTEMA (1965) en RIJTEMA en RYHINER (1966) gegeven verbanden tussen r_c en ψ_1 voor respectievelijk gras en granen en het door ENDRODI en RIJTEMA (1969) gegeven verband voor aardappelen het verloop van de werkelijke verdamping bij verdere uitdroging van de wortelzone worden berekend.

3. Produktie van gewassen

Bij de analyse van de produktiviteit van gronden is het vereist zowel de maximaal mogelijke als de werkelijke produktie per eenheid van bodemoppervlak te kennen. Aangezien de droge stofproduktie van een gewas in hoofdzaak het resultaat is van de netto fotosynthese, kunnen andere stoffen dan koolhydraten kwantitatief worden verwaarloosd. De fotosynthesesnelheid is afhankelijk van de ontwikkeling van het gewas, aangezien hierdoor wordt bepaald in welke mate en gedurende welke periode van het jaar het gewas in staat is om zonne-energie in fotosyntheseprodukten om te zetten.

Hoewel voor praktische doeleinden de totale droge stofproduktie van een gewas van groter belang is dan de dagelijkse produktiesnelheid, is het voor een goed begrijpen van de onderlinge samenhang tussen de verschillende aspecten noodzakelijk op de dagelijkse produktiesnelheid in te gaan. Tevens zal hierbij worden ingegaan op het verband tussen produktie, verdamping en vochtvoorziening.

Voor een verdeling van de door een gewas geproduceerde droge stof over de verschillende delen van de plant en de uiteindelijke economische produktie, blijken voor verschillende gewassen redelijk vaste verbanden te bestaan (RIJTEMA en ENDRODI, 1970, VAN DER WEERD, 1972), al dan niet afhankelijk van de vochtvoorziening tijdens de overgangsfase van vegetatieve naar generatieve groei, bloei en vruchtzetting. Bij de discussie zal hier kort nader op worden ingegaan.

3.1. S t r a l i n g e n p r o d u k t i e

Fotosynthese bestaat uit een aantal biochemische processen, waarbij zonlicht wordt verbruikt van de reductie van CO_2 tot $(\text{CH}_2\text{O})_n$. De produktiesnelheid is hierbij tevens afhankelijk van de aanvoer van CO_2 naar het bladchlorophyl waar deze reductie plaats vindt.

Bij berekeningen van de droge stofproduktie met behulp van agrometeorologische gegevens is het uit praktische overwegingen wenselijk de stralingsenergie als voornaamste factor in het produktiemodel op te nemen, omdat deze factor het gemakkelijkst en met de grootste nauwkeurigheid onder veldomstandigheden is te bepalen. Andere aspecten die betrekking hebben op de fotosynthese kunnen dan als correctiefuncties worden toegepast.

Voor de berekening van de droge stofproduktie van gewassen is de benadering van de fotosynthese, zoals deze door DE WIT (1965) is gegeven, gebruikt als basisterm in een produktiefunctie. De benadering van De Wit is voornamelijk gebaseerd op zonnestraling en bladdistributies. Voor

gestandaardiseerde gewascondities berekende hij de dagelijkse bruto fotosynthesesnelheid zowel voor heldere als bewolkte omstandigheden, onder de aanname dat de lichtintensiteit op bewolkte dagen 20% is van die op heldere dagen. De lichtintensiteit is uitgedrukt in $\text{cal.cm}^{-2}.\text{dag}^{-1}$, waarbij is aangenomen dat de voor fotosynthese actieve straling de helft is van de globale straling. De dagelijkse fotosynthesesnelheid voor De Wit's standaardcondities is gegeven in tabel 5.

Tabel 5. De dagelijkse lichttotalen op zeer heldere dagen (H_c) in $\text{cal.cm}^{-2}.\text{dag}^{-1}$ (400-700 m μ), de fotosynthesesnelheid op zeer heldere dagen (P_c) en op bewolkte dagen (P_o) in $\text{kg CH}_2\text{O.ha}^{-1}.\text{dag}^{-1}$ voor 52° N.B. $r_a = 0,5 \text{ sec.cm}^{-1}$ (DE WIT, 1965)

Datum	15/1	15/2	15/3	15/4	15/5	15/6	15/7	15/8	15/9	15/10	15/11	15/12
H_c	63	119	195	295	375	416	402	337	243	151	81	52
P_c	131	209	299	404	485	526	512	446	350	247	157	114
P_o	52	92	143	203	250	274	265	227	172	113	65	43

De dagelijkse produktiesnelheid kan worden berekend met de vergelijking

$$P_{\text{pot}} = FP_o + (1-F) P_c \quad (11)$$

waarin F de fractie van de tijd weergeeft dat er bewolking optreedt, te berekenen als: $F = (H_c - H_a) (0,8 H_c)^{-1}$, waarin H_c de gemiddelde straling is op heldere dagen en H_a de werkelijke straling gelijk aan $0,5 H_{\text{sh}}$. Hierin is H_{sh} de gemeten of berekende gemiddelde globale straling.

De op deze wijze berekende waarde P_{pot} van de produktie moet worden beschouwd als het potentiële produktieniveau voor een gewas met volledige bodembedekking.

3.2. B e p e r k e n d e f a c t o r e n v o o r d e f o t o s y n - t h e s e

Onder veldomstandigheden treden een aantal factoren op waardoor de netto produktie van een veldgewas afwijkt van het bruto produktieniveau, zoals dit met de methode van De Wit wordt berekend. RIJTEMA en ENDRODI (1970) geven een aantal aspecten, die van belang zijn voor de berekeningen van de netto produktie.

Voor landbouwgewassen is het van belang, dat gedurende een gedeelte van het groeiseizoen geen volledige bodembedekking optreedt. Uit de

gegevens van Rijtema en Endrödi blijkt de produktiesnelheid rechtevenredig te zijn met de fractie van de bodembedekking.

Bij de oorspronkelijke berekeningsmethode werd geen rekening gehouden met de ademhalingsverliezen. Rijtema en Endrödi namen aan dat de ademhalingsverliezen rechtevenredig waren met de produktiesnelheid, zodat een efficiëntiefactor α in de berekeningen kon worden ingevoerd. Voor aardappelen vonden deze auteurs voor α een waarde 0,68. Een nadere analyse door RIJTEMA (1970) van produktiegegevens van SIEMA (1968) gaf voor verschillende gewassen een α -waarde die varieerde tussen 0,6 en 0,7. GAASTRA (1963) geeft voor luzerne een α -waarde variërend van 0,51-0,65 en voor suikerbieten een waarde van 0,7. FEDES (1971) geeft α -waarden van 0,40 tot 0,56 voor rode kool, 0,67 voor bonen en 0,5 tot 0,6 voor blad-selderij.

Voor omstandigheden met lage lichtintensiteiten en vochttekorten is door RIJTEMA en ENDRODI (1970) op basis van de verhouding van transportweerstand een correctieterm ingevoerd die hiermede rekening houdt. Tevens is het effect van afzijging van het gewas door deze auteurs in rekening gebracht.

Onder deze omstandigheden ontstaat de algemene produktievergelijking:

$$P_a = \alpha s_c \frac{4,9}{r_a + r_c + 4,4} P_{pot} \quad (12)$$

Hierin is

- P_a de actuele produktie in $\text{kg CH}_2\text{O} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{dag}^{-1}$
- P_{pot} de maximale standaardproduktie in $\text{kg CH}_2\text{O} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{dag}^{-1}$
- α de efficiëntiefactor
- s_c de bodembedekkingsfractie
- r_a de transportweerstand in de externe lucht voor CO_2
- r_c de diffusieweerstand van het gewas voor CO_2

De waarden van r_a en r_c zijn direct gekoppeld aan de overeenkomstige waarden van $r_a = \left\{ f(z_o d) u^{0,75} \right\}^{-1}$ en r_c uit de verdampingsvergelijking.

3.3. D r o g e s t o f p r o d u k t i e e n v e r d a m p i n g

Hoewel uit de voorgaande beschouwingen blijkt dat produktiesnelheid en verdampingssnelheid op gecompliceerde wijze aan elkaar gekoppeld zijn, is het met zeer ruwe aannamen mogelijk voor de totale produktie over het groeiseizoen en het totale waterverbruik voor praktische doeleinden tot

eenvoudige relaties te komen. Hierbij wordt er vanuit gegaan dat de totale droge stofproduktie over een periode Δt kan worden weergegeven door

$$P_{\Delta t} = \bar{\alpha} \frac{4,9}{\bar{r}_a + \bar{r}_c + 4,4} \bar{s}_c P_{pot} \Delta t \quad (13)$$

terwijl de verdamping over die periode kan worden benaderd door

$$E_{\Delta t} \approx \frac{\bar{\epsilon}_a - \bar{e}_a}{\bar{r}_a + \bar{r}_c} \Delta t \quad (14)$$

Combinatie van beide vergelijkingen geeft:

$$P_{\Delta t} = \bar{\alpha} \frac{4,9}{\bar{r}_a + \bar{r}_c + 4,4} \bar{s}_c P_{pot} (\bar{r}_a + \bar{r}_c) \frac{E_{\Delta t}}{\bar{\epsilon}_a - \bar{e}_a} = a \frac{E_{\Delta t}}{\bar{\epsilon}_a - \bar{e}_a} \quad (15)$$

Voor de produktie over het gehele groeiseizoen geldt dan de vergelijking:

$$P_{tot} = \sum_l^n a \frac{E_{\Delta t}}{\bar{\epsilon}_a - \bar{e}_a} \quad (16)$$

Uit praktijkgegevens blijkt, dat de vergelijking kan worden vervangen door:

$$P_{tot} = a \frac{E_{tot}}{\bar{\epsilon}_a - \bar{e}_a} \quad (17)$$

waarin a een constante is die van het gewas afhankelijk is en $\bar{\epsilon}_a - \bar{e}_a$ het gemiddelde verzadigingsdeficiet gedurende het groeiseizoen. De vergelijking geeft een lineair verband tussen de totale droge stofproduktie en het totale waterverbruik. Het gemiddelde verzadigingsdeficiet geeft een correctie voor de van jaar tot jaar afwijkingen ten gevolge van de weersomstandigheden. Het betekent, dat in een droog jaar met lage luchtvochtigheden voor eenzelfde produktie een groter waterverbruik optreedt dan in een nat jaar met hoge luchtvochtigheden. Indien wordt aangenomen dat de maximale produktie optreedt onder omstandigheden met potentiële gewasverdamping is vergelijking (17) te reduceren tot

$$P_{tot} = P_{max} \frac{E_{re}}{E_{pot}} \quad (18)$$

3.4. V e r d e l i n g v a n d e d r o g e s t o f

Hoewel de totale droge stofproduktie een goede indicatie geeft van de groeiomstandigheden, heeft men veel meer belang in de oogst van die delen van het gewas die van economisch belang zijn. Deze opbrengsten zijn echter sterk afhankelijk van de verdeling van de droge stof over de verschillende delen van de plant. Voor gewassen met enkel een negatieve produktie bestaan er vrij goede relaties tussen de totale droge stofproduktie en het economisch waardevolle produkt, zoals blijkt uit de gegevens van RIJTEMA en ENDRODI (1970) voor aardappelen en uit gegevens van VAN DER WEERD (1972) voor suikerbieten.

Voor gewassen waar de zaden van geoogst worden is de economische produktie in sterke mate afhankelijk van de vochtcondities gedurende de overgangsfase van vegetatieve naar generatieve groei met name gedurende de bloei en de vruchtzetting. Droogteschade gedurende deze periode beïnvloedt in sterke mate de verdeling van de droge stof over de verschillende delen van de plant (RIJTEMA, 1969, 1971).

Voor de meeste gewassen is de spruit - wortel verhouding vrij hoog namelijk in de orde van 6 tot 10. Dit betekent dat kleine wijzigingen in de spruit - wortel verhouding weinig invloed hebben op de relatie tussen droge stofproduktie en verdamping, wanneer alleen bovengrondse delen worden geoogst. Bij gras varieert de spruit - wortel verhouding van 1,5 tot 2,5. Wijzigingen in de spruit - wortel verhouding hebben bij dit gewas grote invloed op de relatie tussen produktie en waterverbruik, indien alleen bovengrondse delen worden geoogst. Het door RIJTEMA (1971) gegeven kromlijnige verband tussen grasproduktie en waterverbruik kan hiermede worden verklaard.

4. Bodemkunde, verdamping en produktie

In het voorgaande is gebleken dat de werkelijke droge stofproduktie rechtevenredig is met de maximale produktie onder optimale omstandigheden vermenigvuldigd met de relatieve verdamping. Onder deze omstandigheden is de produktie direct afhankelijk van het vochtleverend vermogen van de grond.

Met behulp van de fysische eigenschappen van het profiel, zoals dikte van het humeuze dek en effectieve bewortelingsdiepte, de vocht karakteristieken en het capillair geleidingsvermogen is thans een model in ontwikkeling waarmede voor verschillende droogtefrequenties, zowel de gemiddelde

zomer- en winterafvoer, de werkelijke verdamping, alsmede de jaarlijkse gang van de grondwaterstand kan worden berekend (RIJTEMA, 1971, 1973). Voor de gemiddelde droogtefrequentie (50% jaar) volgen uit deze berekeningen tevens de gemiddeld hoogste en gemiddeld laagste waterstanden. De door de bodemkundige vaak op grond van profielkenmerken gemiddeld hoogste en gemiddeld laagste grondwaterstanden vaak toch gevoelsmatige schatting van de bodemproductiviteit, kan met behulp van deze meer fundamentele berekeningswijze een objectieve basis verkrijgen. De verkregen resultaten bij toepassing van een dergelijke methode voor de landbouwkundige gevolgen van de grondwaterwinning bij Losser geven een duidelijke aanwijzing in deze richting (RIJTEMA, 1973).

LITERATUUR

- EHLIG, C.F. and W.R. GARDNER. 1964. Relationship between transpiration and the internal relations of plants. *Agron. J.* 56: 127-130.
- ENDRODI, G. and P.E. RIJTEMA. 1969. Calculation of evapotranspiration from potatoes. *Neth.J. Agric. Sci.* 17: 283-299. *Techn.Bull.ICW* 69.
- FEDDES, R.A. 1971. Water, heat and crop growth. *Meded. Landbouwhogeschool* 71. 12: 184 pp.
- FEDDES, R.A. and P.E. RIJTEMA. 1972. Water withdrawal by plant roots. *J. Hydrology* 17, 1/2: 33-59. *Techn. Bull. ICW* 83.
- GAASTRA, P. 1959. Photosynthesis of crop plants as influenced by light, carbon dioxide, temperature and stomatal diffusion resistance. *Meded. Landbouwhogeschool* 59. 13.
- GAASTRA, P. 1963. Climatic control of photosynthesis and respiration. In: *Environmental control of plant growth* (Ed. E.T. Evans). *Acad. Press New York*: 113-140.
- GARDNER, W.R. 1960. Dynamic aspects of water availability to plants. *Soil Sci* 89: 63-73.
- KEMPER, P.J.C. 1961. The effects of environmental factors on the transpiration of leaves with special reference to stomatal light response. *Meded. Landbouwhogeschool* 61. 7
- PENMAN, H.L. 1948. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proc. Roy. Soc. London A* 193: 120-145.
- RIJTEMA, P.E. 1965. An analysis of actual evapotranspiration. *Agric. Res. Rep.* 659.

- RIJTEMA, P.E. 1966. Derived meteorological data: Transpiration. Proc. Symp. Agric. Res. Reading. Misc. Repr. ICW 67.
- RIJTEMA, P.E. 1968. On the relation between transpiration, soil physical properties and crop production as a basis for water supply plans. Versl. Meded. Hydrol. Comm. TNO 15: 28-57.
Techn. Bull. ICW 58.
- RIJTEMA, P.E. 1969. Soil moisture forecasting. Nota ICW 513.
- RIJTEMA, P.E. 1970. The effect of light and water potential on dry matter production of field crops. Unesco Symp. Plant response on climatic factors, Uppsala, Sweden.
- RIJTEMA, P.E. 1973. De landbouwkundige gevolgen van de waterwinning bij Losser (in voorbereiding).
- RIJTEMA, P.E. and G. ENDRODI. 1970. Calculation of production of potatoes. Neth J. Agric. Sci. 18: 26-36. Techn. Bull. ICW 70.
- RIJTEMA, P.E. and A.H. RYHINER. 1966. Aspecten van verdamping en resultaten van verdampingsonderzoek. Med. ICW 108.
- SIEMA, L. 1968. Growth of closed green crop surfaces in the Netherlands. Neth. J. Agric. Sci 16, 4 : 211-216.
- SLUYS, P. VAN DER. 1973. Vochtleverantie en beworteling van de grond (in druk).
- WEERD, B. VAN DER. 1972. De te verwachten gevolgen van een inpoldering van de Mosselbanken voor de opbrengst van de belangrijkste landbouwgewassen in de Paulina, Elisabeth en Braakmanpolder. Nota ICW 678.
- WIT, C.T. DE. 1965. Photosynthesis of leaf canopies. Agric. Res. Rep. 663.