

VIII. VERDAMPING EN OPBRENGST

C. T. DE WIT

Instituut voor Biologisch en Scheikundig Onderzoek van Landbouwgewassen

SUMMARY

TRANSPIRATION AND CROP YIELDS

In this article a short survey of a study on transpiration and crop yields is given. A more detailed report in the English language may be found elsewhere (DE WIT 1958).

1. INLEIDING

De laatste jaren is voornamelijk aandacht besteed aan de grootte van de evaporanspiratie van gewasoppervlakken, en dan nog veelal in de toestand, dat de beschikbaarheid van water geen beperkende factor is. Aan het verband tussen verdamping en opbrengst is veel minder gewerkt, waarschijnlijk omdat dit onderwerp zich minder leent voor een fysische en dus kwantitatieve benadering.

Enkele jaren terug is door schrijver dezes juist aan genoemde zijde van het verdampingsvraagstuk aandacht besteed.

Hier zal slechts een korte uiteenzetting van de resultaten gegeven worden; voor gedetailleerde beschouwingen en de daarbij geraadpleegde literatuur moet verwezen worden naar een uitgebreider artikel (DE WIT 1958).

2. TRANSPIRATIE EN DROGE-STOFPRODUKTIE VAN PLANTEN IN POTTEN

Tot een twintig jaar geleden werd veel aandacht besteed aan de bepaling van de transpiratiecoëfficiënt. Dit is de verhouding $W P^{-1}$ tussen de getranspireerde hoeveelheid water (W) en de droge-stofproduktie van in potten verbouwde planten (P); deze wordt veelal uitgedrukt in de eenheid (kg water) (kg droge stof)⁻¹.

BRIGGS, SHANTZ, PIEMIEZEL en DILLMAN vonden dat de transpiratiecoëfficiënt min of meer evenredig is met de verdamping van een vrij water-

oppervlak (E_o) gemiddeld over de groeiperiode. De spreiding van de punten om een gemiddelde lijn bleek echter zeer groot, hetgeen toegeschreven werd aan de invloed van de groeiomstandigheden zoals temperatuur, bodemvruchtbaarheid en watervoorziening. Het is nu echter bewezen, dat de spreiding een gevolg is van een onjuiste statistische bewerking van de proefresultaten en dat niet het quotiënt WP^{-1} vergeleken moet worden met de waarde van E_o , maar de droge-stofproductie P met de waarde van het quotiënt WE_o^{-1} .

De resultaten van bovengenoemde auteurs, verkregen in verschillende plaatsen van het aride midden van de Verenigde Staten in verschillende

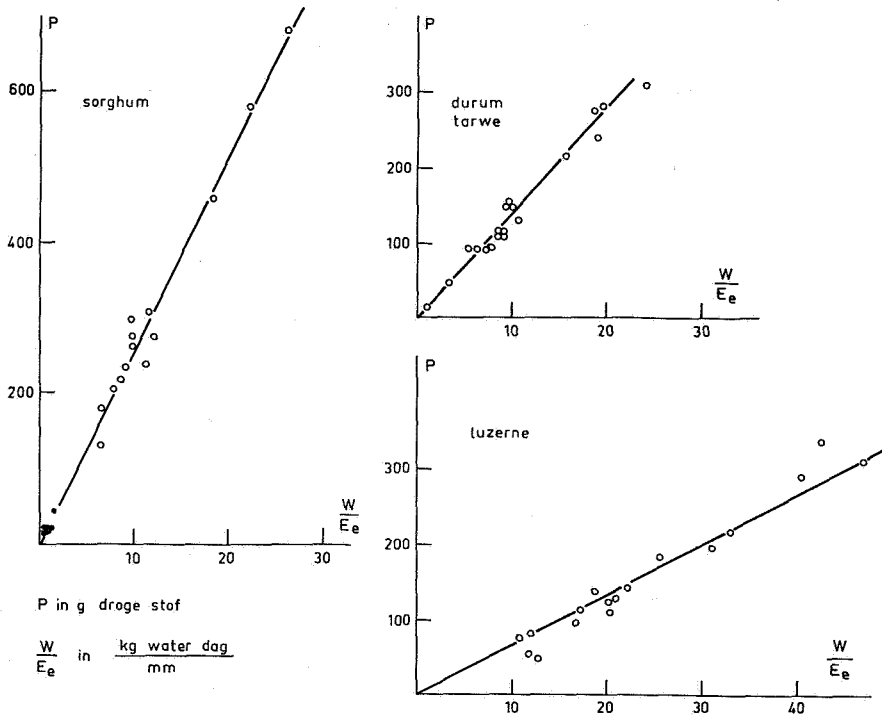


FIG. 1. Het verband tussen de droge-stofproductie P en de verhouding WE_e^{-1} van de verdampte hoeveelheid water W en de verdamping van een vrij wateroppervlak E_e voor planten in potten in het aride midden van de Verenigde Staten; gegevens ontleend aan BRIGGS, SHANTZ en PIEMIESEL

FIG. 1. The relation between dry matter production (P) and the ratio WE_e^{-1} between the transpired amount of water (W) and free water evaporation (E_e), for plants in containers, grown in the arid region of the U.S.A.

jaren, zijn op de genoemde wijze uitgezet in figuur 1 voor de gewassen sorghum, tarwe (een durum-variëteit) en luzerne. In plaats van door E_o is \mathcal{W} hier door de verdamping van een verdampingspan (E_e) gedeeld, welke evenredig is met E_o . Het blijkt dat de spreiding van de punten om een rechte door de oorsprong klein is, zodat het verband tussen de drogestofproductie en het quotient $\mathcal{W}E_o^{-1}$ weergegeven kan worden door de vergelijking:

$$P = m \mathcal{W} E_o^{-1} \quad (1)$$

waarin m een gewasconstante is, welke respectievelijk 20,7, 11,5 en 5,5 (g droge stof mm) (kg water dag)⁻¹ blijkt te bedragen voor de gewassen sorghum, durumtarwe en luzerne. De waarde van E_o komt in deze vergelijking overeen met de waarde van E_o berekend volgens PENMAN.

Zetten we de resultaten van proeven in Nederland op overeenkomstige wijze uit, dan blijken de waarnemingen niet op een rechte lijn te liggen. Dit is echter wel het geval wanneer de drogestofproductie P uitgezet wordt tegen de getranspireerde hoeveelheid water \mathcal{W} alléén, zoals te zien in figuur 2.

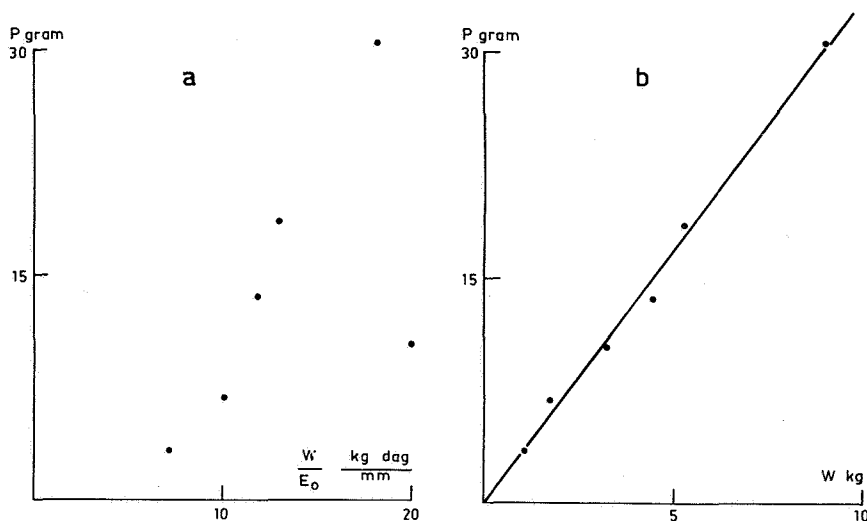


FIG. 2. Het verband tussen de drogestofproductie P en de verhouding $\mathcal{W}E_o^{-1}$ van de verdampte hoeveelheid water \mathcal{W} en de verdamping van een vrij wateroppervlak E_o (a), alsmede dat tussen P en de verdampte hoeveelheid water \mathcal{W} (b) voor erwten in potten in Nederland; gegevens ontleend aan BOONSTRA

FIG. 2. The relation between dry matter production (P) and the ratio $\mathcal{W}E_o^{-1}$ between the transpired amount of water (\mathcal{W}) and free water evaporation (E_o) (figure a) and between dry matter production (P) and the transpired amount of water (\mathcal{W}) (figure b) for peas grown in the Netherlands

De spreiding van de punten om een rechte door de oorsprong blijkt in figuur 2b klein te zijn, zodat het verband tussen P en \mathcal{W} weergegeven kan worden door de wel erg eenvoudige vergelijking:

$$P = n \mathcal{W} \quad (2)$$

waarin n een gewasconstante is, welke voor de gewassen bieten, erwten en haver respectievelijk 6,1, 3,4 en 2,6 (g droge stof) (kg water)⁻¹ bedraagt.

In de gegeven figuren resteert weinig spreiding welke eventueel toegeschreven zou kunnen worden aan de groeiomstandigheden. Uit een uitvoerige bewerking van proefresultaten van ettelijke auteurs blijkt dan ook, dat de waarden van m en n slechts weinig afhangen van de vruchtbaarheid van de grond mits deze niet te laag is, van de watervoorziening mits deze niet te hoog is en van de onderlinge beschaduwing van planten mits deze niet te sterk is. Deze kwalitatieve uitspraken, welke geïllustreerd zijn in figuur 3, kunnen niet kwantitatief gepreciseerd worden.

De invloed van weersverschillen van jaar tot jaar blijken klein te zijn. Dit geldt niet voor klimaatverschillen, zoals trouwens genoegzaam blijkt uit de verschillende vergelijkingen voor de Verenigde Staten en Nederland.

3. DE FYSIOLOGISCHE ACHTERGROND

De droge-stofproduktie P is gelijk aan de netto assimilatiesnelheid en de verdampte hoeveelheid water \mathcal{W} aan de transpiratiesnelheid, beide geïntegreerd over het gehele groeiseizoen.

Uit de beschouwingen van MAKKINK in deze reeks blijkt voldoende, dat de transpiratiesnelheid en de verdamping van een vrij wateroppervlak vrijwel evenredig zijn met de onderschepde hoeveelheid straling. Uit kwantitatieve beschouwingen, waarvoor in zijn geheel naar het in de inleiding genoemde artikel verwezen moet worden, blijkt dat de assimilatiesnelheid onder de in Nederland overheersende weersomstandigheden ook min of meer evenredig is met de straling, terwijl deze in het zonnige klimaat van het aride midden van de Verenigde Staten vrijwel onafhankelijk is van de straling.

Dit verklaart waarom in de Verenigde Staten voor het verkrijgen van een eenvoudig verband tussen droge-stofproduktie en getranspireerde hoeveelheid water de waarde \mathcal{W} door E_o gedeeld dient te worden, terwijl dit in Nederland waar assimilatie- en transpiratiesnelheid beide van de straling afhangen niet het geval is.

De vergelijkingen (1) en (2) blijken dus grensgevallen te zijn van de meer algemene vergelijking:

$$P = y \mathcal{W} E_o^{-x} \quad (3)$$

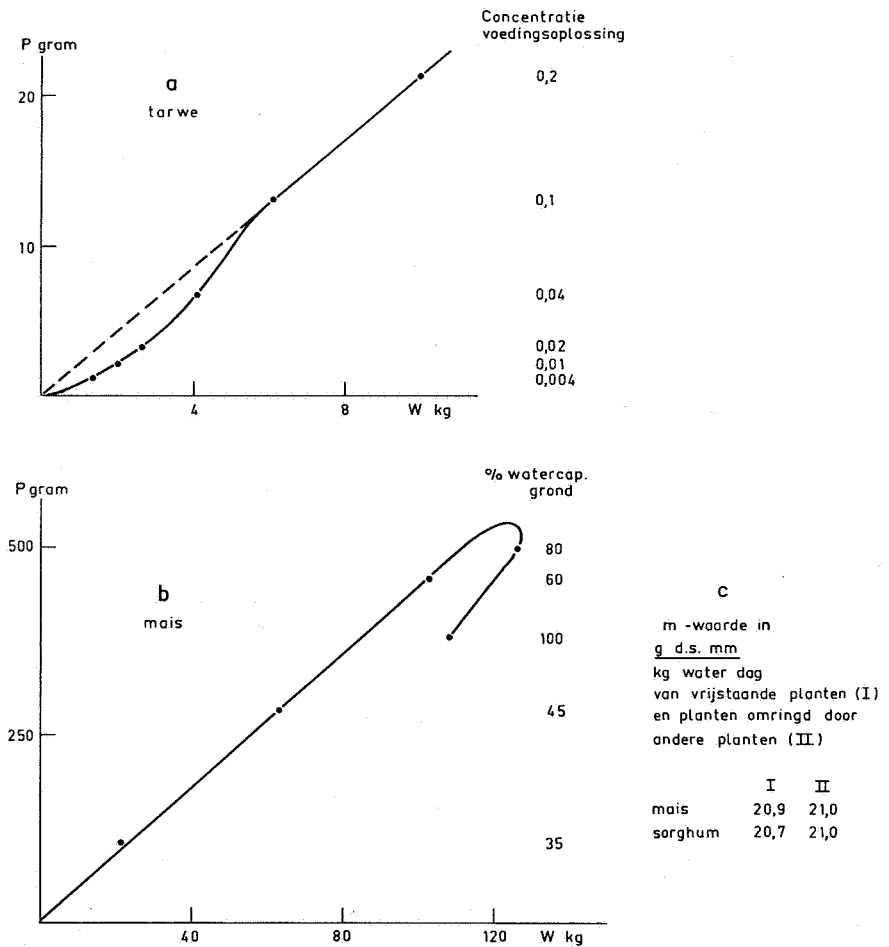


FIG. 3. De invloed van de groeiomstandigheden op het verband tussen transpiratie en produktie

a: De invloed van de voorziening met mineralen

b: De invloed van de vochtvoorziening

c: De invloed van onderlinge beschaduwing

Gegevens ontleend aan THOM en HOLTZ, KIESSELBACH, SHANTZ en PIEMIESEL

FIG. 3. The influence of growing conditions on the relation between transpiration and production

a: The influence of the nutrient level

b: The influence of soil moisture

c: The influence of mutual shading

met voor x een waarde tussen nul en één. Er zijn ongetwijfeld landen en klimaten waar x een waarde meer midden tussen deze twee uitersten aanneemt, evenals het voorstelbaar is dat in erg zonnige jaren in het humide Nederland de waarde van n en in erg sombere jaren in het aride midden van de Verenigde Staten de waarde van m enigermate van E_o afhangen.

Onder invloed van verschillen in vruchtbaarheid vormen planten meer of minder bladeren, dat wil zeggen meer of minder assimilerend en transpirerend oppervlak. Alléén wanneer de vruchtbaarheid erg gering is, vormt de plant bladeren die aanmerkelijk minder assimileren. Van planten die lijden aan tekort aan water zijn de huidmondjes dicht. Gedurende een dergelijke periode wordt vrijwel niets bijgedragen aan assimilatie en transpiratie, zodat het verband tussen opbrengst en verdamping vrijwel geheel bepaald wordt gedurende de perioden dat de huidmondjes open zijn. Bladeren die in de schaduw van andere bladeren zitten ontvangen weinig straling en dragen om deze reden weinig bij aan assimilatie en transpiratie. Zo kan, althans kwalitatief, de kleine invloed van vruchtbaarheid, watervoorziening en gewasdichtheid op de waarde van m en n verklaard worden.

4. VERDAMPING EN OPBRENGST IN HET VELD

Er bleek een eenvoudig verband te bestaan tussen verdamping en drogestofopbrengst van in potten verbouwde planten, mits de vruchtbaarheid niet te laag, de beschikbaarheid van water niet te hoog en het gewas niet te dicht was. Deze extreme omstandigheden komen in het veld niet voor, indien de groei onder veldomstandigheden beperkt wordt door de beschikbaarheid van het water.

Het verband tussen de verdampte hoeveelheid water en de droge-stofopbrengst in het veld moet, onder de omstandigheid dat de watervoorziening de groei beperkt, dus kwantitatief hetzelfde zijn als het verband voor planten welke in potten verbouwd zijn.

Het in het humide Nederland geldende verband is $P = n \mathcal{W}$. De waarde van n voor haver bleek $2,6$ (g droge stof (kg water) $^{-1}$) te zijn of $2,6$ (10^{-3} kg droge stof) (10^{-4} mm ha) $^{-1} = 26$ kg ha $^{-1}$ mm $^{-1}$ in eenheden geschikt voor het gebruik onder veldomstandigheden. Onder omstandigheden waarbij water de opbrengst beperkt, dient dus de verdampte hoeveelheid water in mm met 26 vermenigvuldigd te worden om de droge-stofopbrengst van haver te verkrijgen.

Het in het aride midden van de Verenigde Staten geldende verband is $P = m \mathcal{W} E_o^{-1}$. De waarde van m voor durumtarwe bleek $11,5$ (g droge stof mm) (kg water dag) $^{-1}$ te zijn of $11,5$ (10^{-3} kg droge stof mm) (10^{-4} mm ha

dag)⁻¹ = 115 kg ha⁻¹ dag⁻¹. Omdat de waarde van m onafhankelijk is van E_o , is het het gemakkelijkst de droge-stofopbrengst in hectare te vergelijken met de verhouding $W E_o^{-1}$ uitgedrukt in dagen. Bijvoorbeeld wanneer W gelijk is aan 200 mm en E_o gelijk aan 5 mm dag⁻¹, dan is $W E_o^{-1}$ gelijk aan $200/5 = 40$ dagen. Geheel analoog aan de uitdrukking „transpiratie in mm” gebruiken we hiervoor de uitdrukking „transpiratie in dagen”.

De bovenstaande verbanden tussen verdamping en opbrengst in het veld zijn weergegeven door de lijnen l in figuur 4a voor durumtarwe in de Verenigde Staten en in figuur 4b voor haver in Nederland. De droge-stofopbrengst in kg/ha is uitgezet langs de verticale as en de verdampte hoeveelheid water, hetzij in dagen (figuur a) hetzij in mm (figuur b), langs de horizontale as.

De verbanden gelden alléén wanneer water de beperkende factor is. Om te beoordelen of dit op een bepaald veld wel of niet het geval is, is het nodig de opbrengst te kennen wanneer water niet beperkend is. Deze laatste kan bepaald worden met een eenvoudige proef, waarbij het desbetreffende gewas verbouwd wordt in een grond met een vochtgehalte nabij de veldcapaciteit. Het op deze wijze bepaalde oogstniveau P_b is in de grafieken van figuur 4 voorgesteld door de lijn P.

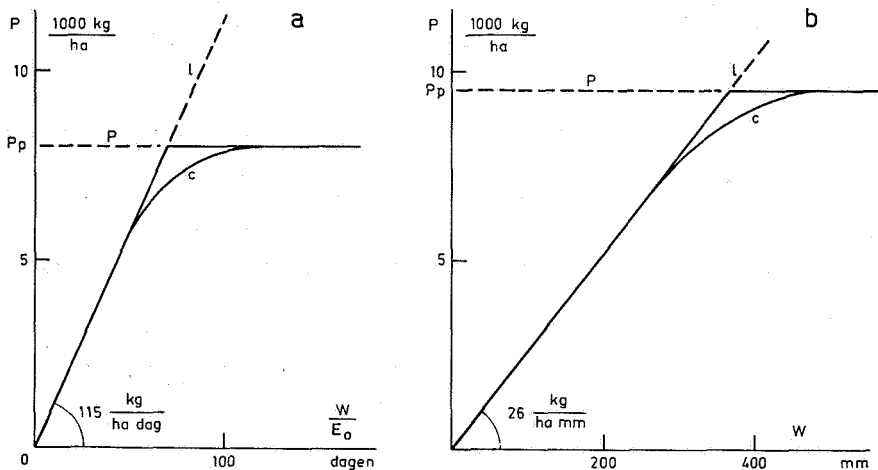


FIG. 4. Het verband tussen de verdamping (in dagen of mm) en droge-stofopbrengst in 1000 kg/ha van durumtarwe in het aride midden van de Verenigde Staten (a) en van haver in Nederland (b)

FIG. 4. The relation between transpiration (in days or mm) and dry matter yield in 1000 kg/ha of durum wheat in the arid region of U.S.A. (a) and oats in the Netherlands (b)

Omdat de waarden van m en n de neiging hebben lager uit te vallen, wanneer het water niet beperkend en de gewasdichtheid groot is, kan verwacht worden dat het werkelijke verband tussen de verdamping en de droge-stofopbrengst voorgesteld kan worden door een kromme c , die aan de ene zijde begrensd wordt door de lijn l en aan de andere zijde door de lijn P (fig. 4). Wanneer water in het minimum is, zal de getranspireerde hoeveelheid water gelijk zijn aan de voor transpiratie beschikbare hoeveelheid water; de krommen c geven dus ook het verband weer tussen de beschikbare hoeveelheid water en de opbrengst.

Dit nu blijkt inderdaad het geval te zijn, zoals te zien is in figuur 5. Hier is langs de verticale as de hooiopbrengst van luzerne uitgezet en langs de horizontale as de getranspireerde hoeveelheid water in dagen. De lijn

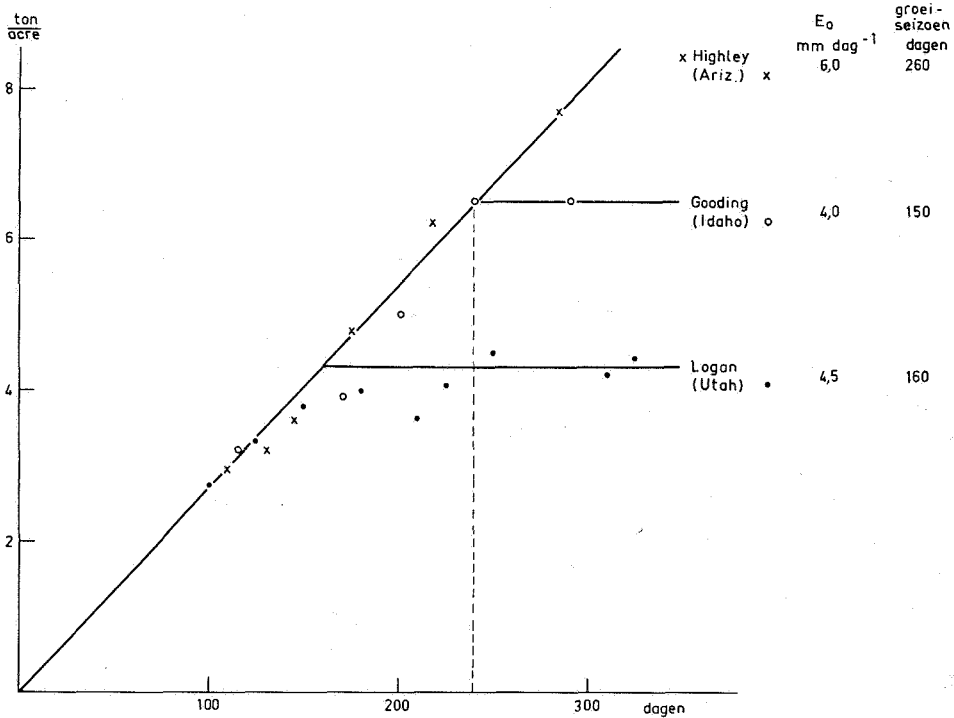


FIG. 5. Het verband tussen verdamping in dagen en hooioogst in ton/acre van luzerne op een drietal proefvelden in de Verenigde Staten; gegevens ontleend aan HARRIS en PITTMAN, FORTIER, MARR

FIG. 5. The relation between transpiration in days and yield of alfalfa hay in tons per acre for three experiments in the U.S.A.

door de oorsprong heeft een helling welke — na omrekening — gelijk is met die van luzerne in figuur 1. De waarnemingen zijn ontleend aan irrigatieproeven in de Verenigde Staten. Ondanks het grote verschil in E_o in de drie verschillende plaatsen, blijken de waarnemingspunten op de velden waar water de groei beperkte, samen te vallen met de uit de potproeven berekende lijn. Het produktieniveau in de drie plaatsen is uiteraard niet hetzelfde.

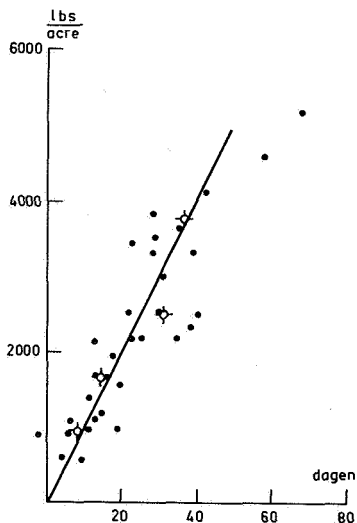


FIG. 6. Het verband tussen verdamping in dagen en droge-stofopbrengst in lbs/acre van durumtarwe voor verschillende plaatsen en jaren in het aride midden van de Verenigde Staten; gegevens ontleend aan COLE en MATHEWS

FIG. 6. *The relation between transpiration in days and dry matter yield of durum wheat in different years and at different places of the dry region of the U.S.A.*

In figuur 6 is het verband aangegeven tussen de droge-stofopbrengst van durumtarwe en de verdampte hoeveelheid water uitgedrukt in dagen, zoals waargenomen in verschillende plaatsen en jaren in het aride midden van de Verenigde Staten. De helling van de getrokken lijn komt weer overeen met die voor durumtarwe in figuur 1. De grote open punten zijn gemiddelden van de afzonderlijke waarnemingen. Deze blijken vrijwel samen te vallen met de getrokken lijn. In al deze gevallen was water de factor die de groei beperkte.

In de in de inleiding genoemde publikatie worden meer voorbeelden gegeven — ook van Nederlandse proeven — die de bruikbaarheid van de hier gegeven benadering bevestigen. Daar wordt ook uitvoerig ingegaan op de geringe invloed die de verdeling van de beschikbare hoeveelheid water over de groeiperiode heeft op het verband tussen droge-stofopbrengst en verdamping, alsmede op het verband tussen droge-stofopbrengst en zaadopbrengst bij tarwe.

De waarde van m voor luzerne in de Verenigde Staten is ongeveer 55 kg

$\text{ha}^{-1} \text{dag}^{-1}$, terwijl de groeisnelheid onder gunstige omstandigheden zeker meer dan $100 \text{ kg ha}^{-1} \text{dag}^{-1}$ kan bedragen. Uit substituering van deze waarden in de vergelijking $P = m \mathcal{U} E_o^{-1}$ blijkt, dat de op deze wijze berekende transpiratiesnelheid wel twee maal groter kan zijn dan de verdamping van een vrij wateroppervlak.

Uit fysische overwegingen volgt echter, dat de verdamping van een uitgestrekt gewasoppervlak niet groter kan zijn dan ruwweg $1,2 E_o$.

Uit ettelijke veldproeven blijkt dat er omstandigheden zijn, waarbij de werkelijke verdamping aanmerkelijk groter is dan die van een vrij wateroppervlak, terwijl niettemin het verband tussen transpiratie en produktie hetzelfde is als in potten. Dit is bijvoorbeeld het geval in Gooding (figuur 5), waar de minimum transpiratie nodig voor maximale produktie 240 dagen bedroeg, terwijl het groeiseizoen slechts 150 dagen lang was. De verdamping op dit proefveld was dus gemiddeld $240/150 = 1,6$ maal de verdamping van een vrij wateroppervlak. De waarnemingen in de figuur liggen niettemin op de uit pot-experimenten berekende rechte door de oorsprong.

De verklaring van deze schijnbare tegenstrijdigheid is dat proefvelden geen „uitgestrekte” velden zijn in de fysische betekenis van het woord, d.w.z. velden waarop de advectieve aanvoer van energie verwaarloosbaar klein is. „Uitgestrekte” velden zijn althans in aride gebieden van een orde van grootte van minstens één vierkante kilometer.

Voor de praktijk komt het hier op neer. De schatting is betrouwbaar, wanneer de op de hier aangegeven wijze uit de opbrengst geschatte verdamping kleiner is dan de verdamping van een vrij wateroppervlak. Wanneer de schatting aanmerkelijk groter uitvalt dan de verdamping van een vrij wateroppervlak, is de werkelijke verdamping gelegen tussen een waarde ongeveer gelijk aan E_o en de uit de opbrengst geschatte waarde. Op kleine velden nadert de werkelijke verdamping de uit de opbrengst geschatte waarde en op grote velden die van een vrij wateroppervlak. Grote velden zijn velden in de orde van minstens één vierkante kilometer en kleine velden in de orde van hoogstens een aantal hectares (in aride gebieden tot wel 40 ha).

LITERATUUR

WIT, C. T. DE Transpiration and crop yields. *Verslagen Landb. Onderz.* 64.6, 1958.